ON4CRD

第05卷

滤波器计算



Radio Club Durnal ON4CRD

https://on4crd.be

法律声明

第05卷 • 滤波器计算

网站发布者 : Radio Club Durnal ON4CRD

出版经理 : Radio Club Durnal ON4CRD 委员会

https://on4crd.be

法律声明

知识产权

网站上发布的文本、图像、文件、徽标和材料仍属于其各自作者或俱乐部的财产。任何复制或再利用都必须尊重来源、适用权利和任何作者许可。

责任

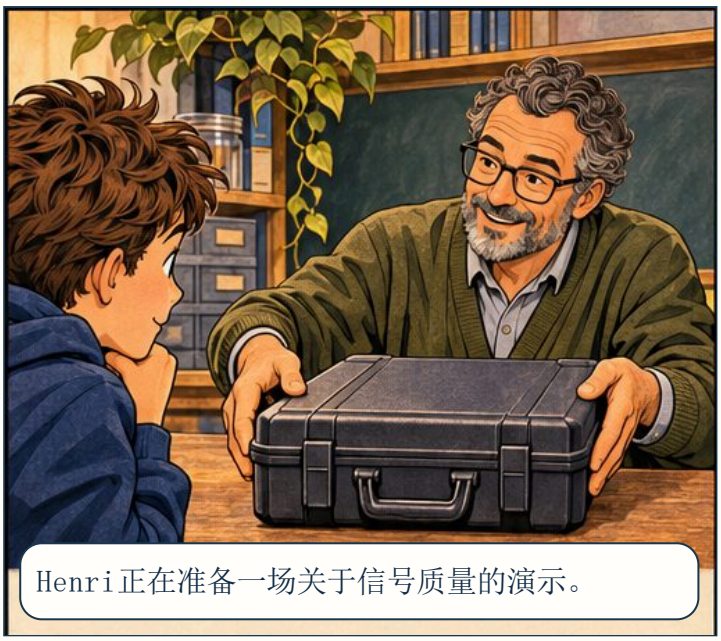
俱乐部致力于发布有用且经过验证的信息，但不保证不存在错误、遗漏或中断。当技术或监管信息支持决策时，必须对照官方来源进行检查。

插图在人工智能辅助下创作。

新的任务



电学活动结束后，Lucas在俱乐部重新拿起笔记本。



Henri正在准备一场关于信号质量的演示。



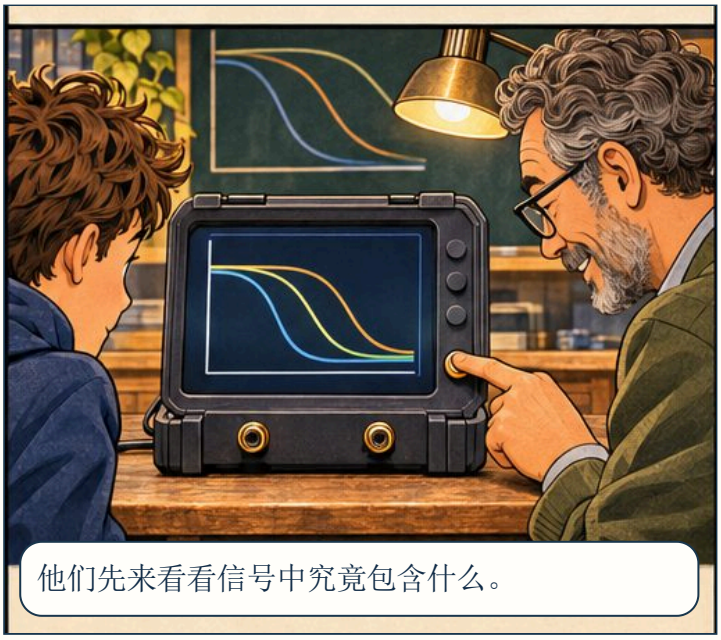
桌上放着两个电容和一个线圈。



这次挑战是理解、计算，再测量一个低通滤波器。



少年想知道，三个元件为什么能改变一切。

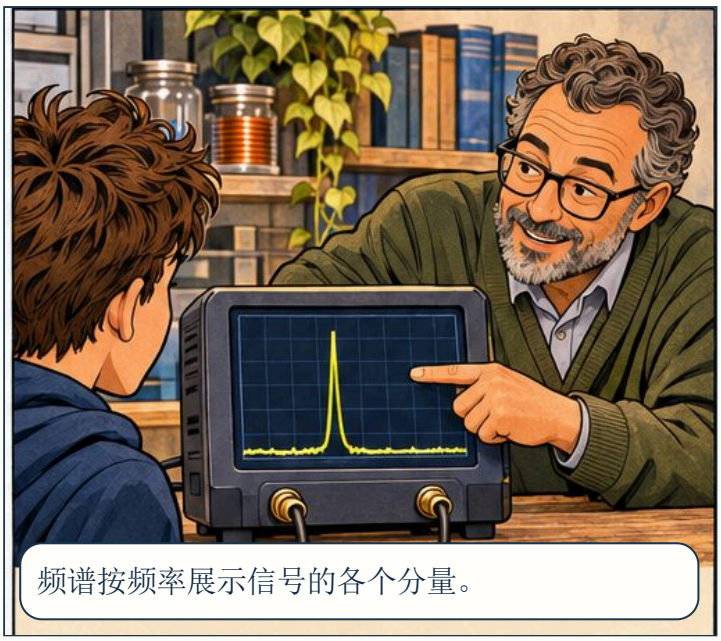


他们先来看看信号中究竟包含什么。

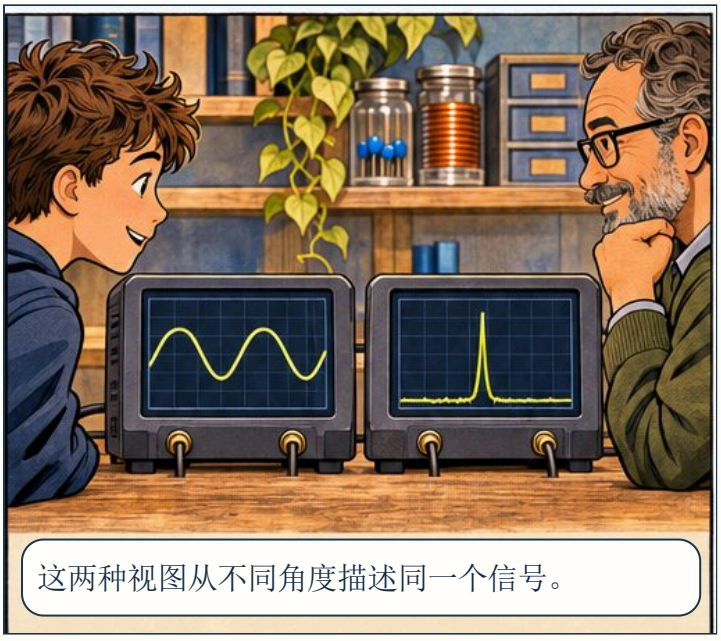
信号的两幅画像



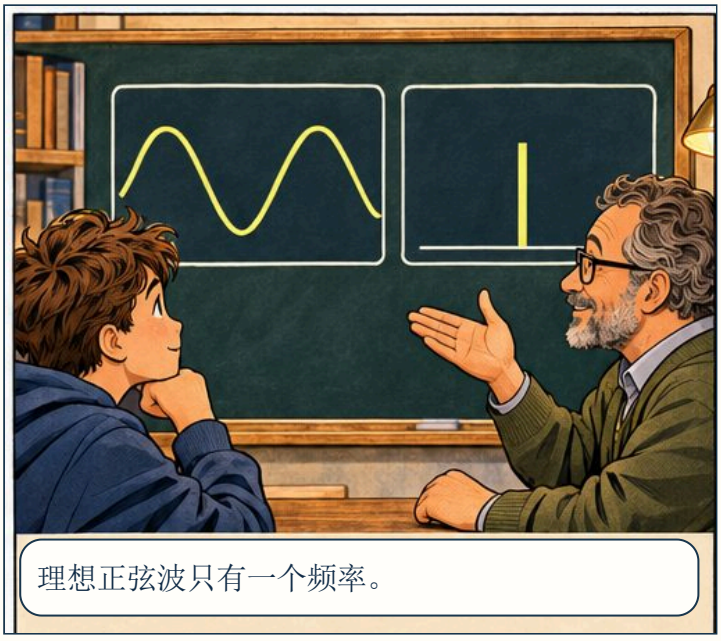
时域曲线展示信号怎样随时间变化。



频谱按频率展示信号的各个分量。



这两种视图从不同角度描述同一个信号。



理想正弦波只有一个频率。

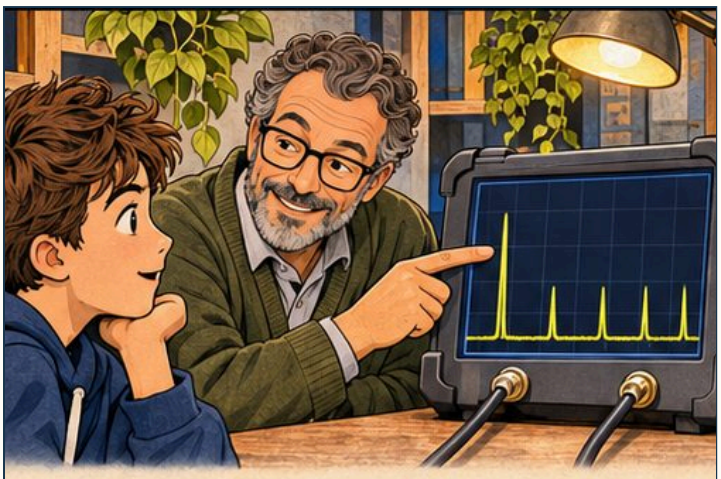


失真的波形可能包含多个分量。



少年发现了一幅自己原先读不懂的画像。

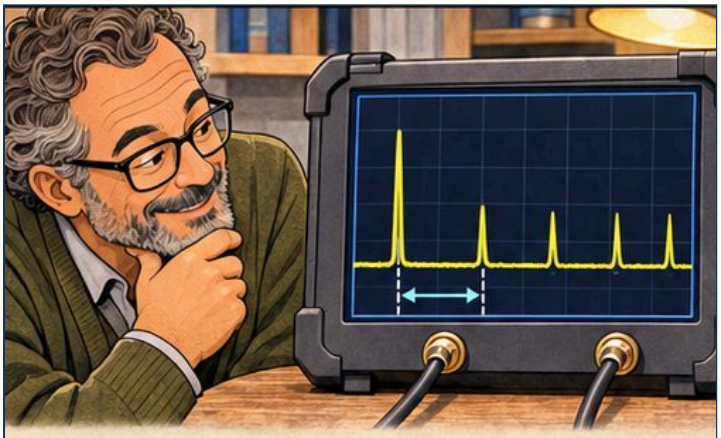
谐波显现了



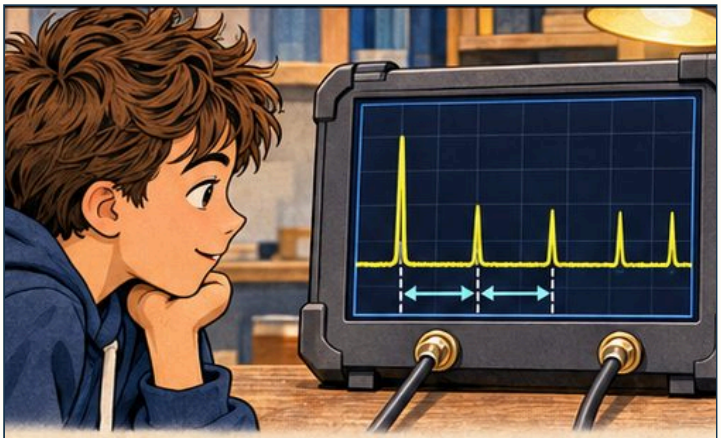
基频是周期信号的第一个参照。



谐波的频率是基频的整数倍。



二次谐波位于基频的两倍处。



三次谐波位于基频的三倍处。

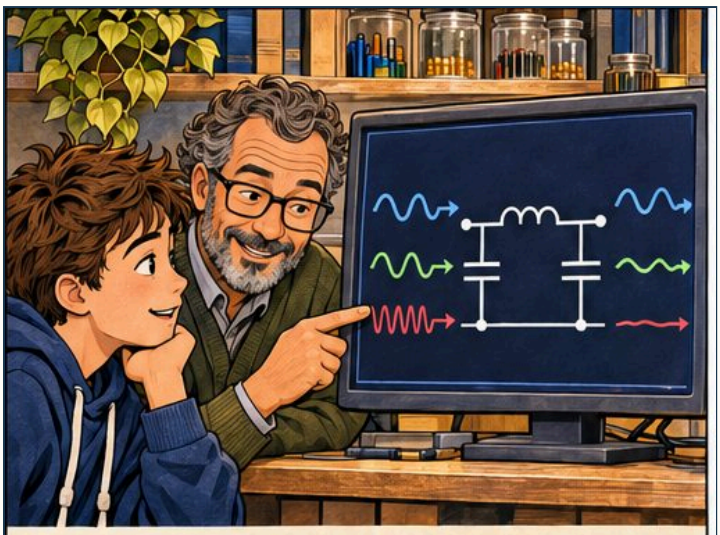


不过，并非所有不需要的分量都是谐波。

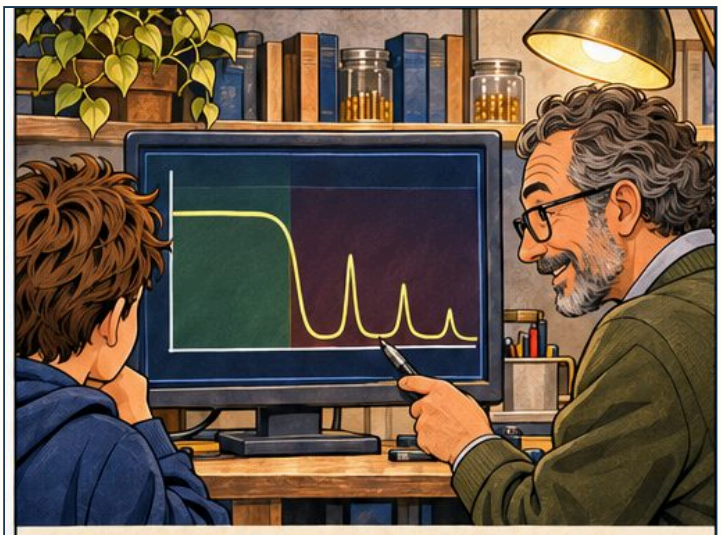


滤波器必须满足一个明确的需求。

决定保留什么



滤波器对不同频率的分量产生不同影响。



首先要明确有用频率和干扰频率。



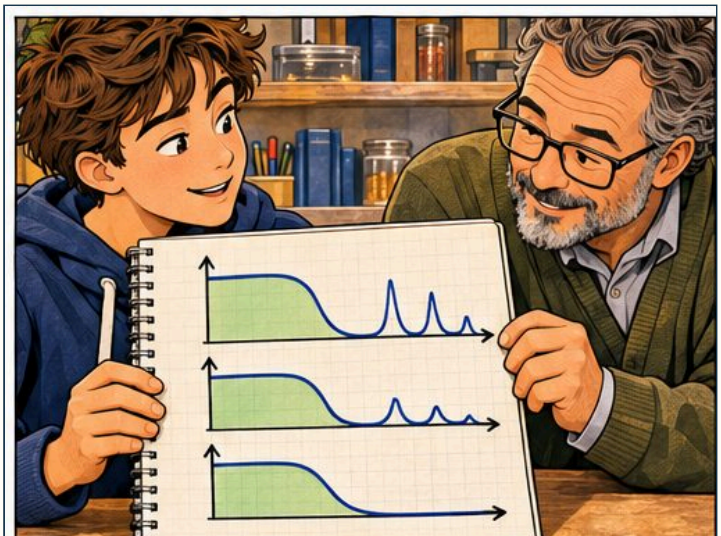
还要确定希望达到的衰减量。



没有这些目标，计算元件值就意义不大。

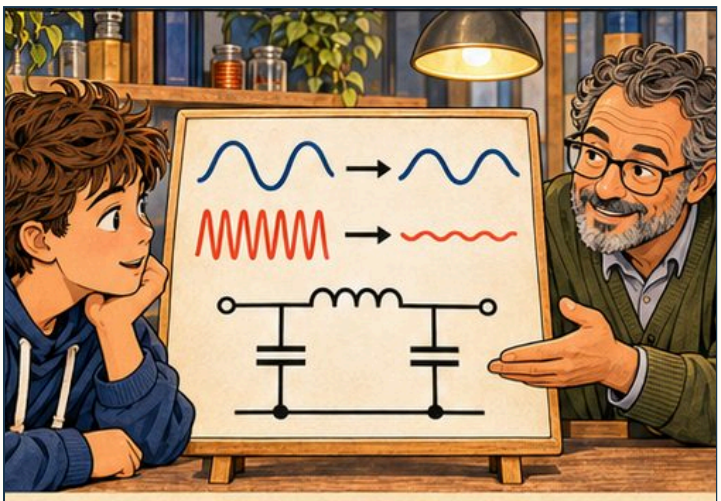


少年在示例频谱中圈出有用的区域。



他的笔记本变成了设计要求书。

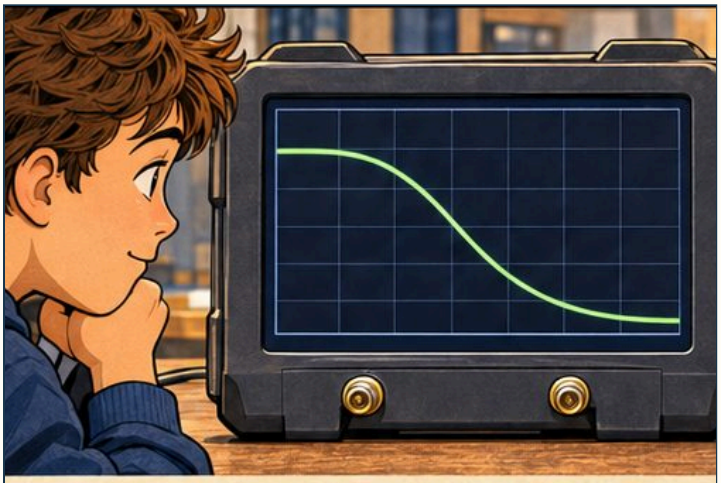
选择低通滤波器



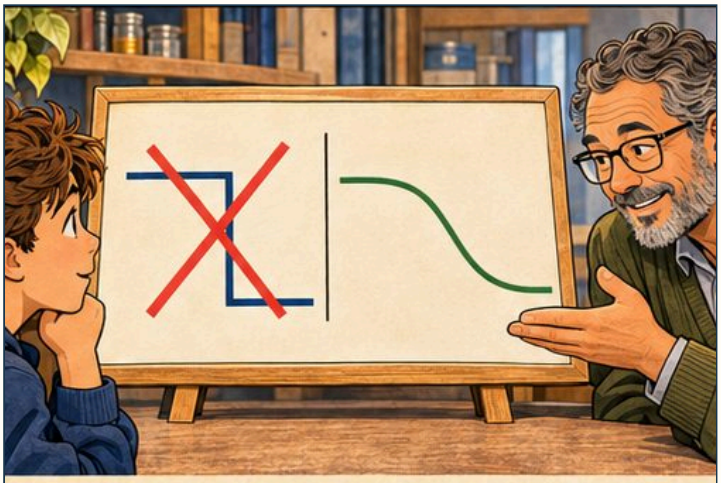
低通滤波器对低频的传输优于高频。



它的通带位于低频一侧。



往高频方向，衰减逐渐增大。



实际的过渡从来不是完美的垂直墙壁。



这种类型适合今天的演示。



少年画出斜坡，而不是一道屏障。

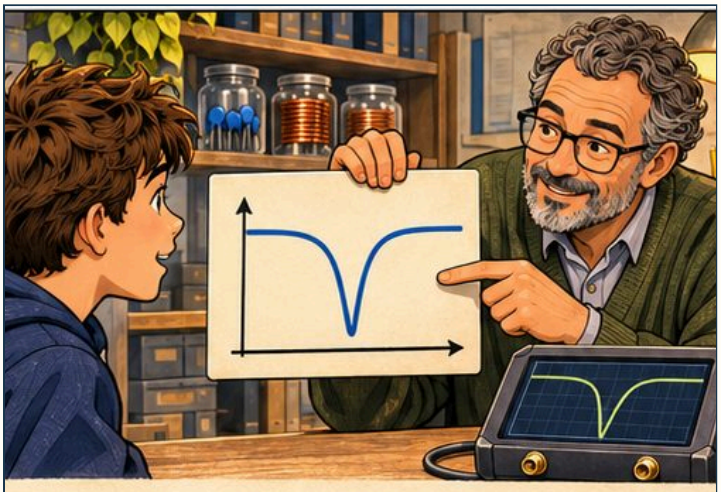
其他可能的路径



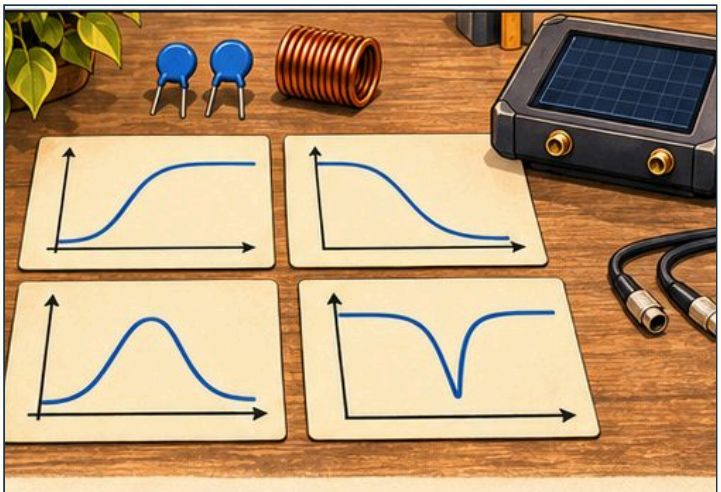
高通滤波器衰减低频，保留高频。



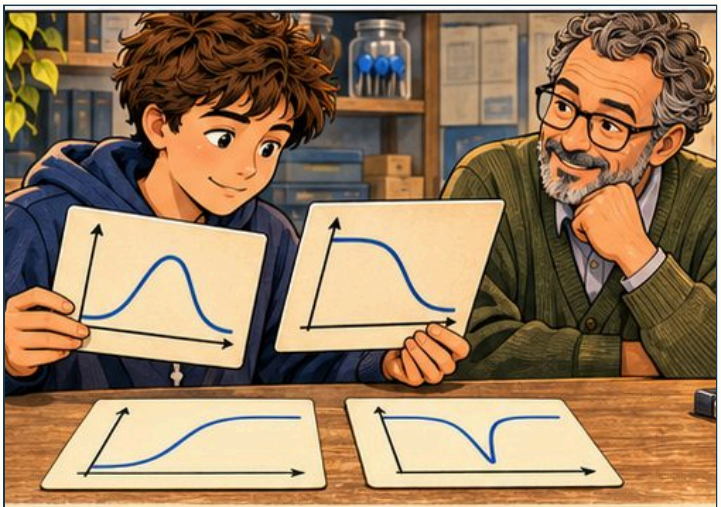
带通滤波器主要通过两个边界之间的频段。



带阻滤波器则衰减选定的一个频段。



这些类型满足不同的需求。

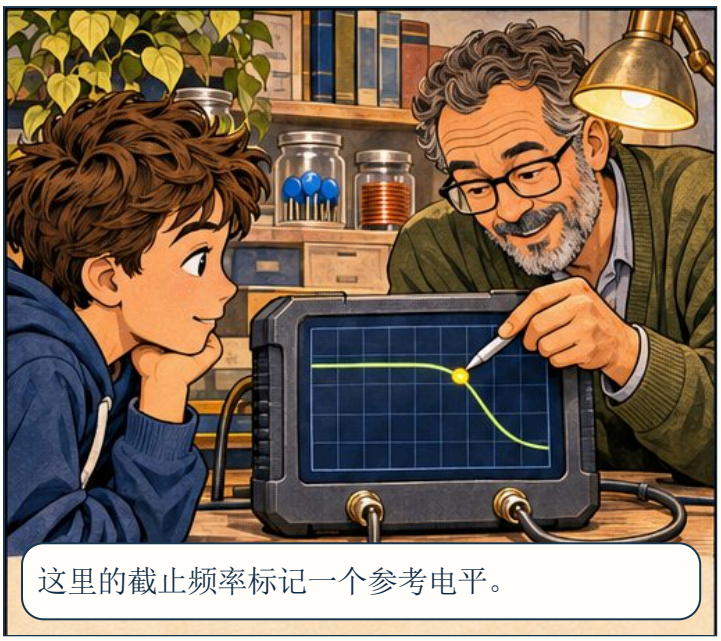


名称描述的是响应，而不是普遍的优劣。



少年把另外三张卡片留到下次活动。

截止之后仍能通过



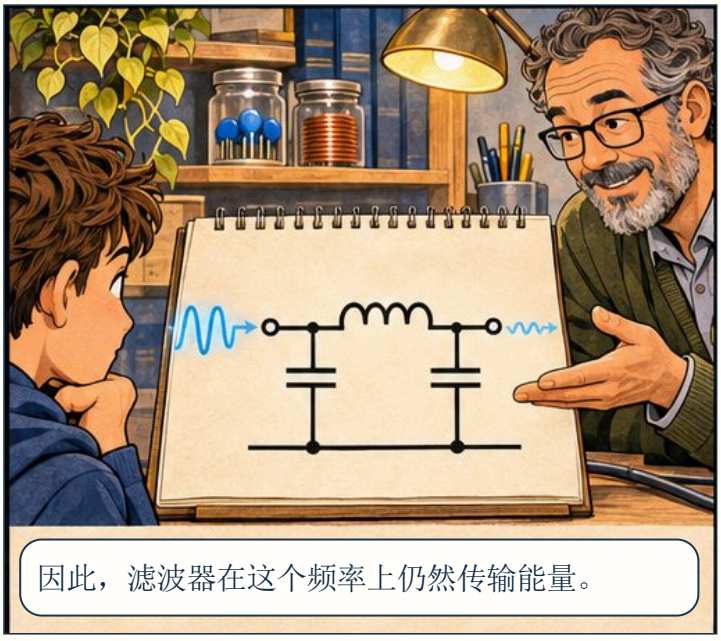
这里的截止频率标记一个参考电平。



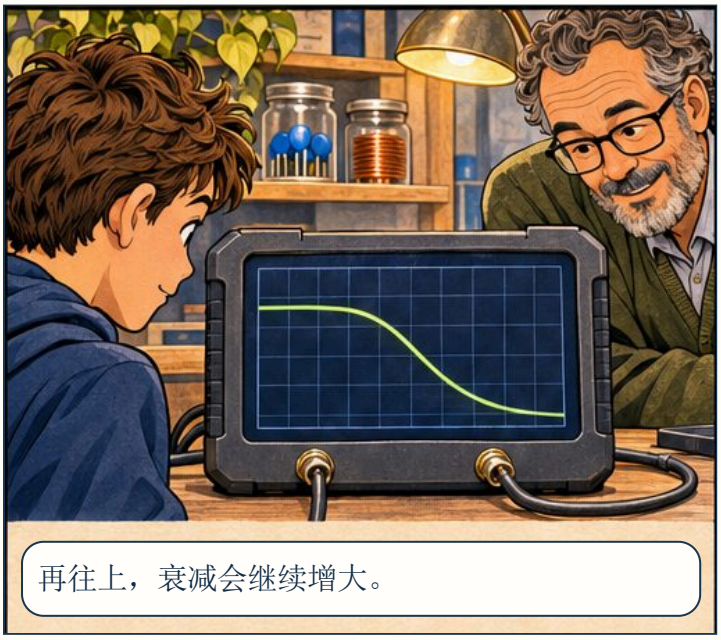
它并不表示信号会突然消失。



对他们的理想巴特沃思滤波器，它对应约 −3 dB。



因此，滤波器在这个频率上仍然传输能量。



再往上，衰减会继续增大。

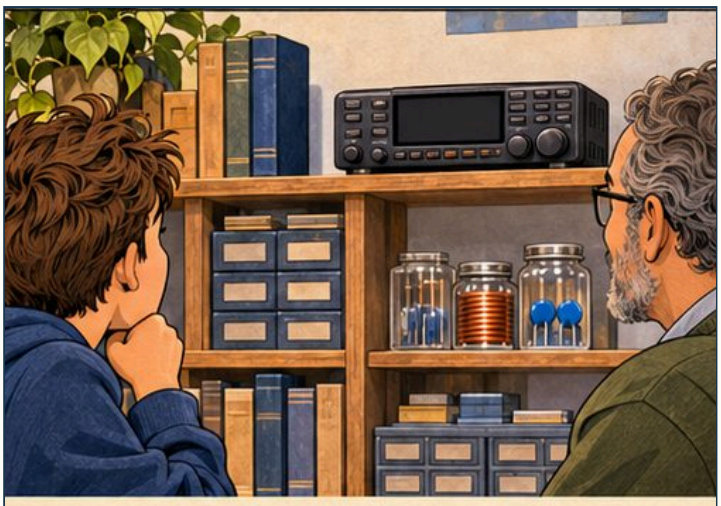


这项说明避免了第一个误解。

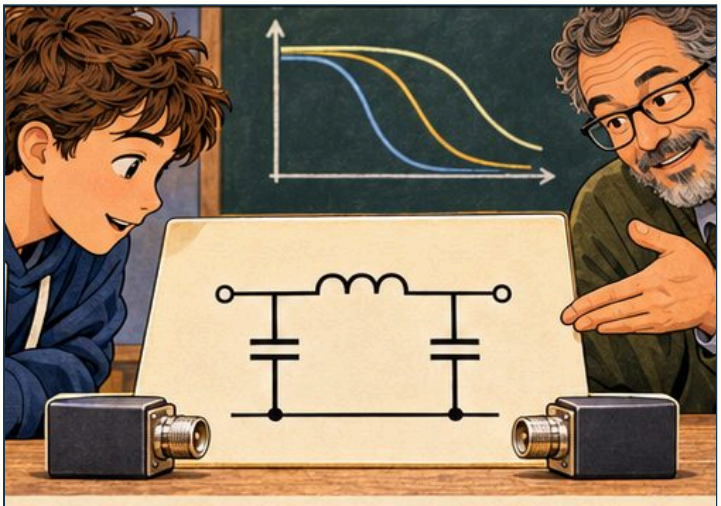
实验室里的例子



他们选择 10 MHz 的理论截止频率。



这个数值用于学习，并不规定发射频率。



参考信号源和负载都采用 50 Ω。



他们将在工作台上用小信号研究电路。



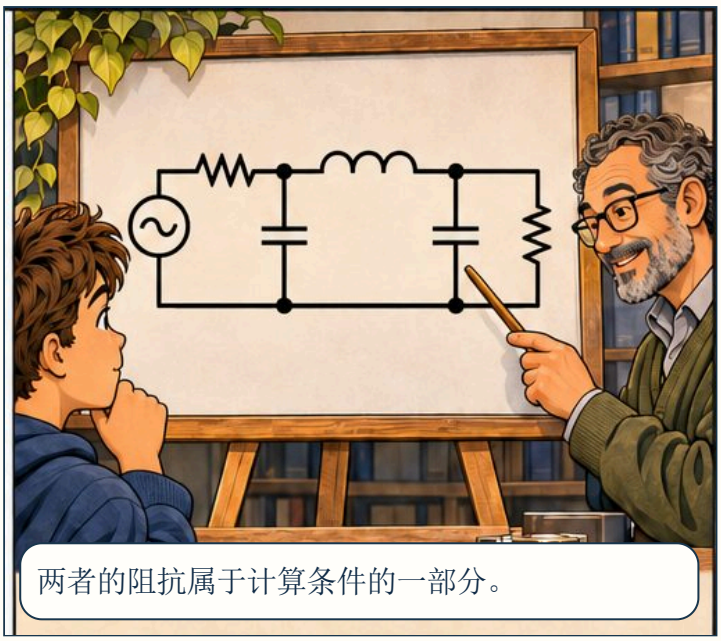
不会连接天线或发射机。

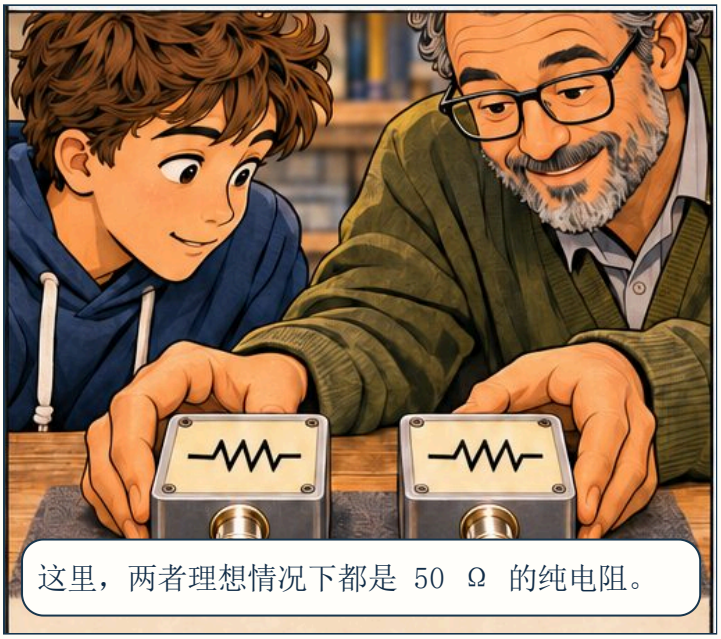


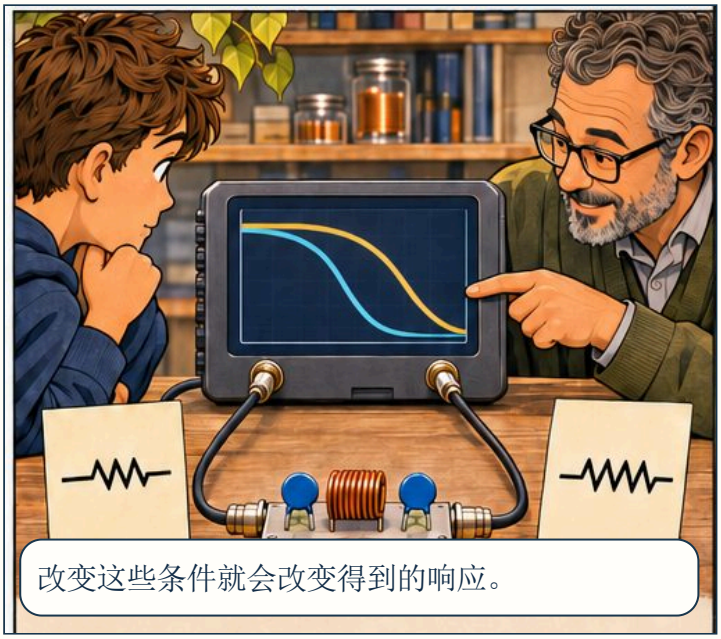
目标是得到可测量的响应，而不是进行无线电通联。

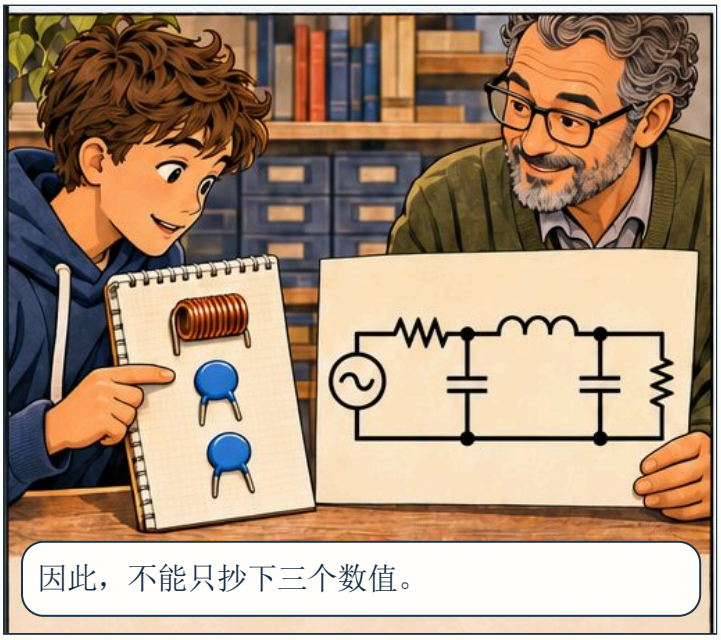
为什么要说明 50 欧姆？

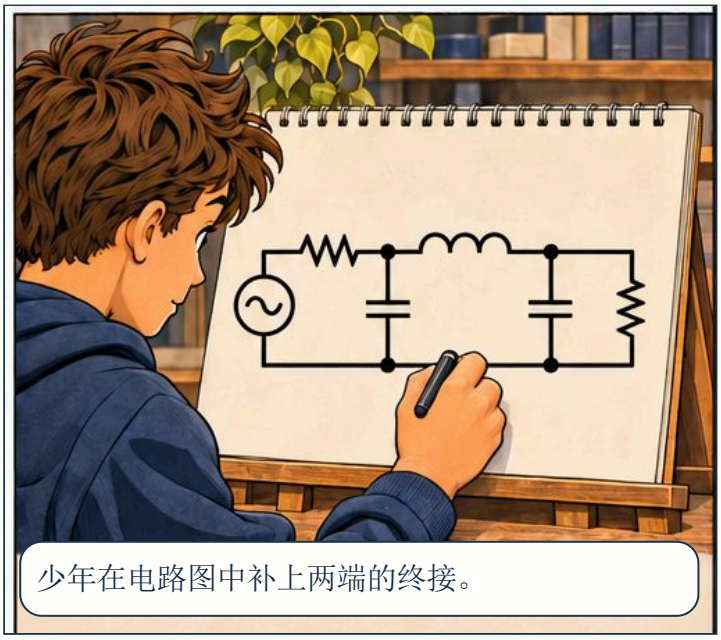

滤波器工作在信号源与负载之间。


两者的阻抗属于计算条件的一部分。

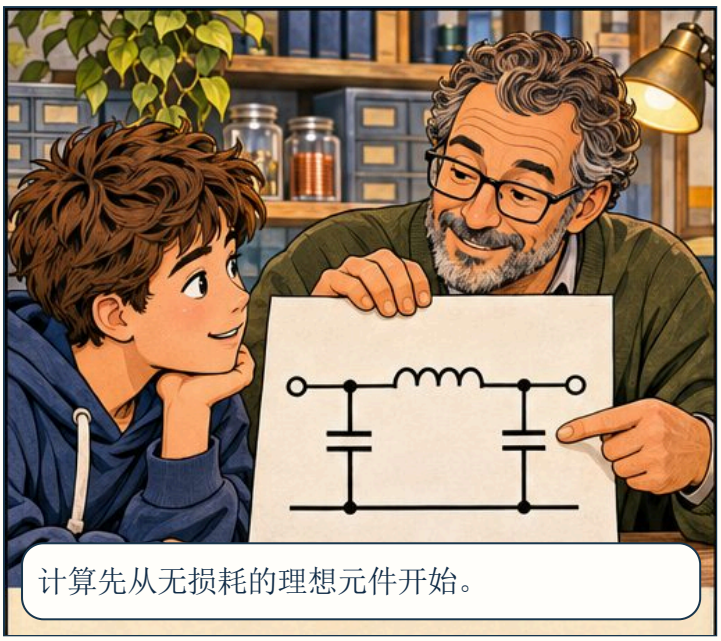

这里，两者理想情况下都是 50 Ω 的纯电阻。


改变这些条件就会改变得到的响应。


因此，不能只抄下三个数值。


少年在电路图中补上两端的终接。

模型与实际电路



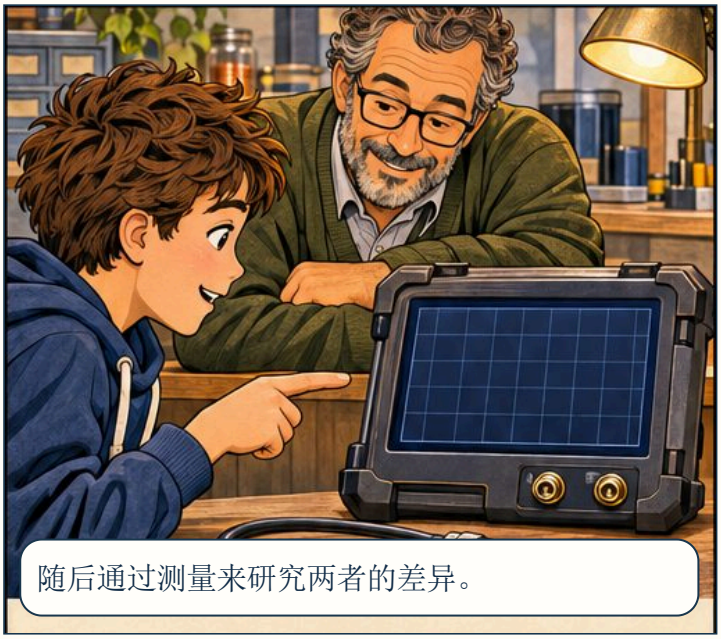
计算先从无损耗的理想元件开始。



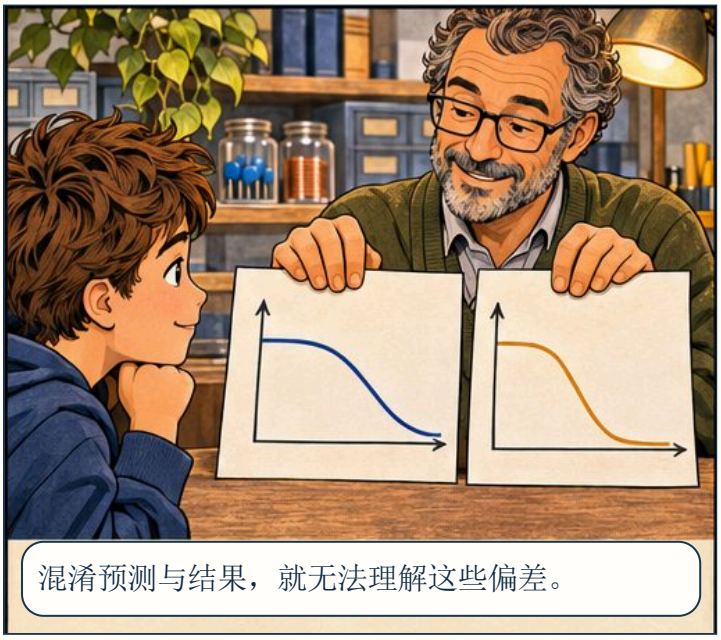
实际电路会存在电阻和寄生效应。



模型让他们先预测一个响应。



随后通过测量来研究两者的差异。

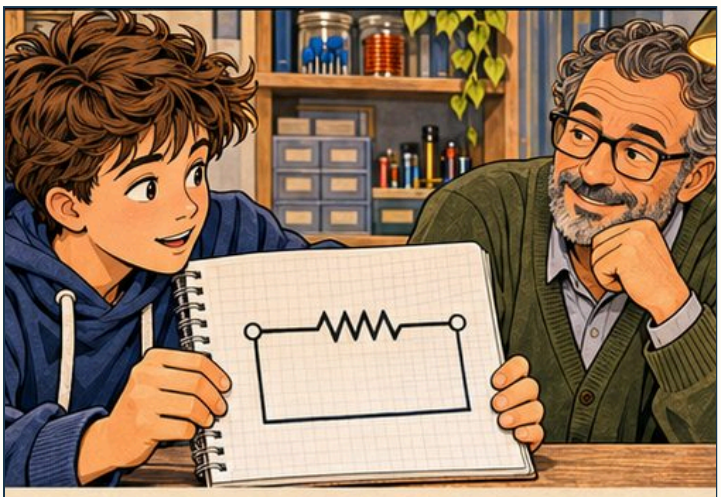


混淆预测与结果，就无法理解这些偏差。

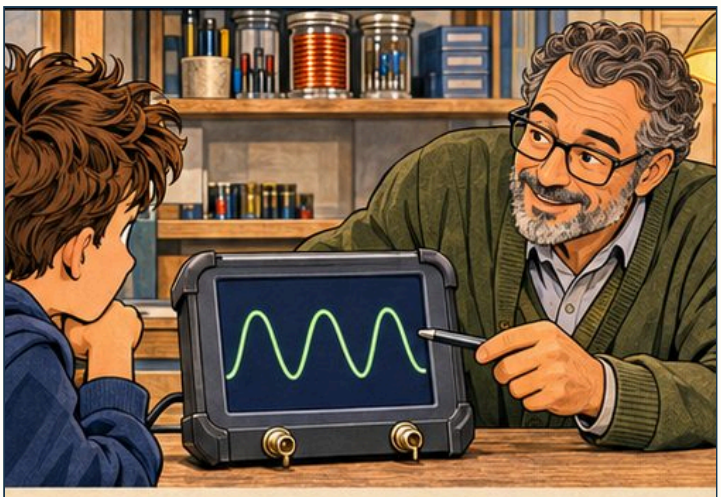


笔记本为两者分别留出位置。

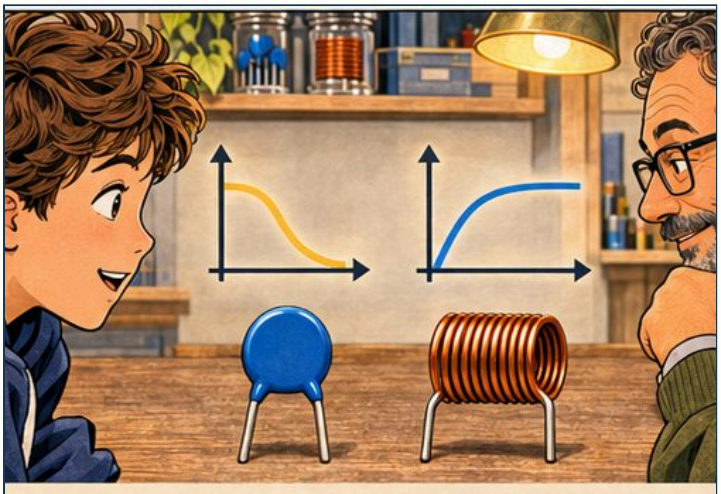
只有电阻已经不够



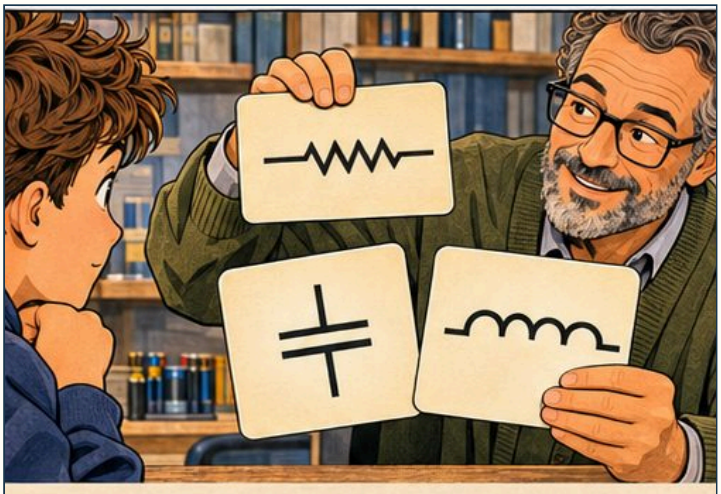
上一册在直流条件下联系了电压、电流与电阻。



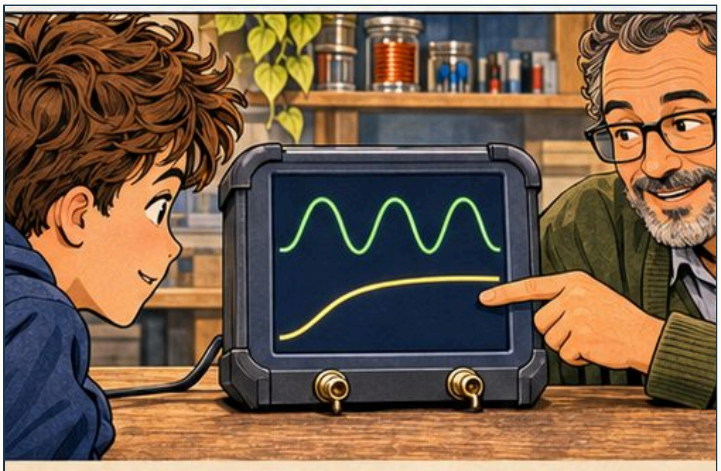
这里的信号变化很快，频率也很重要。



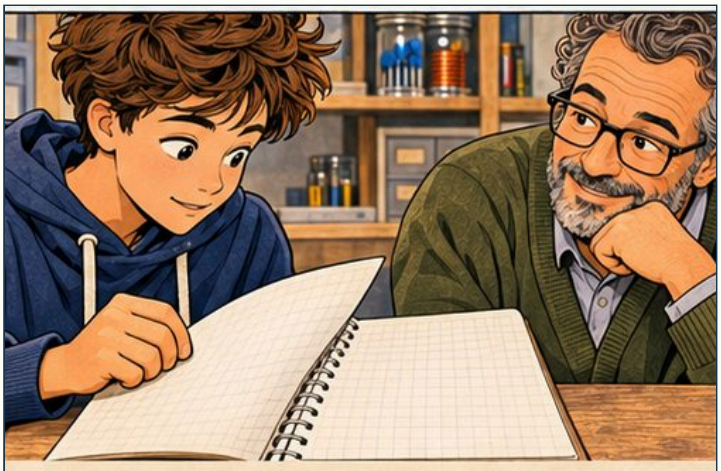
电容和线圈的阻碍作用取决于频率。



这种电抗不同于单纯的电阻。



阻抗更全面地描述交流条件下的电学特性。

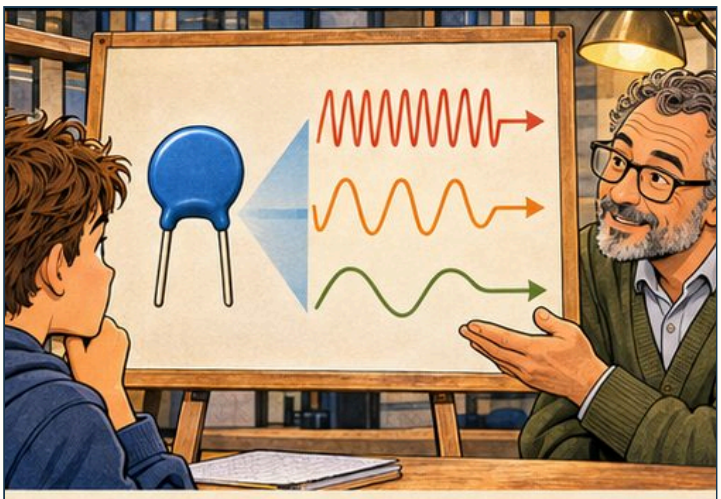


少年明白了为什么需要一个新模型。

电容的作用



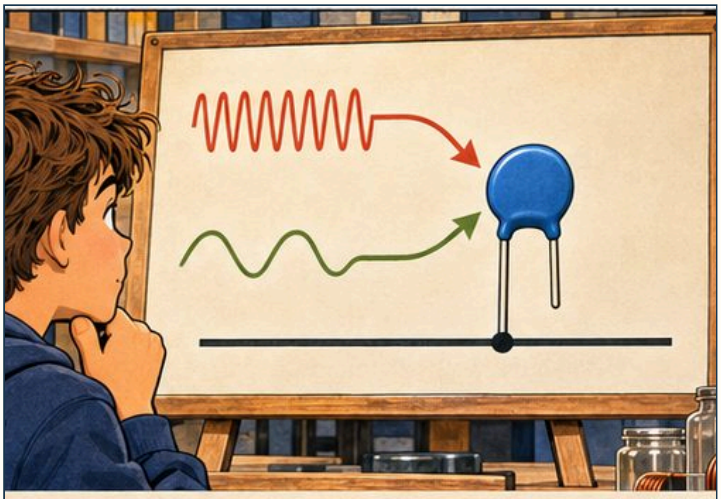
电容量用 C 表示，单位为法拉，符号 F。



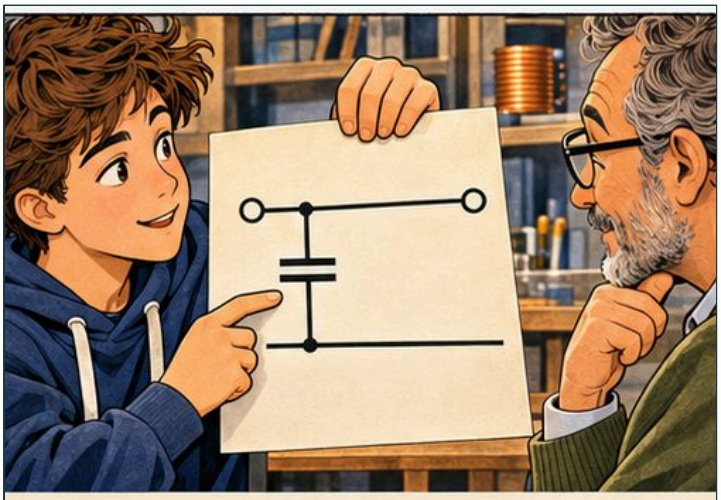
理想电容的电抗大小随频率升高而减小。



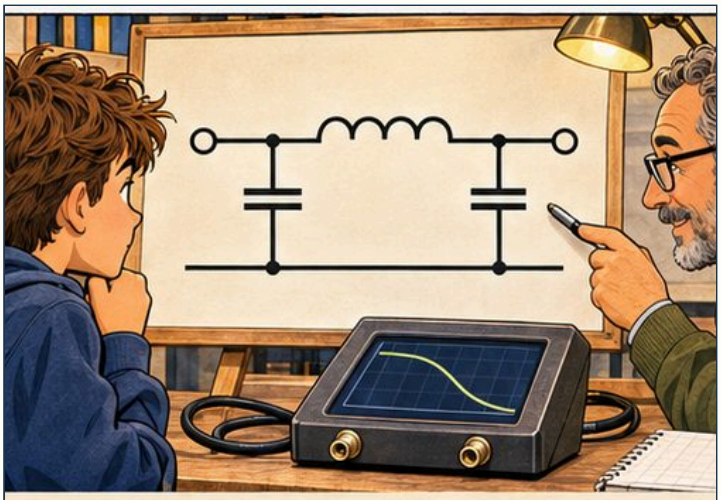
其绝对值为 Xc = 1/(2πfC)。



电容量相同时，高频遇到的电抗更小。



在他们的滤波器中，电容将连接到电路公共地。

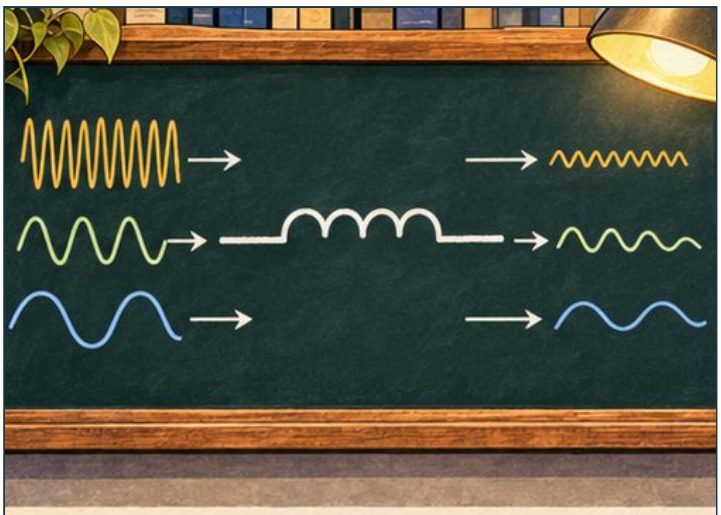


电容的作用也取决于电路的其他部分。

线圈的作用



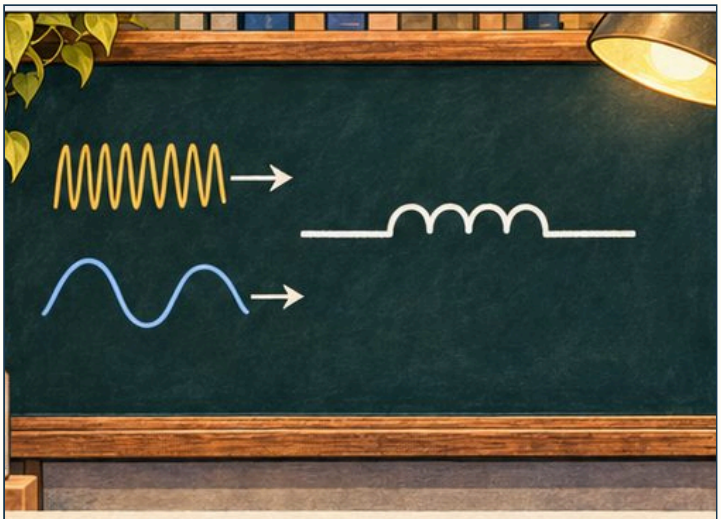
电感量用 L 表示，单位为亨利，符号 H。



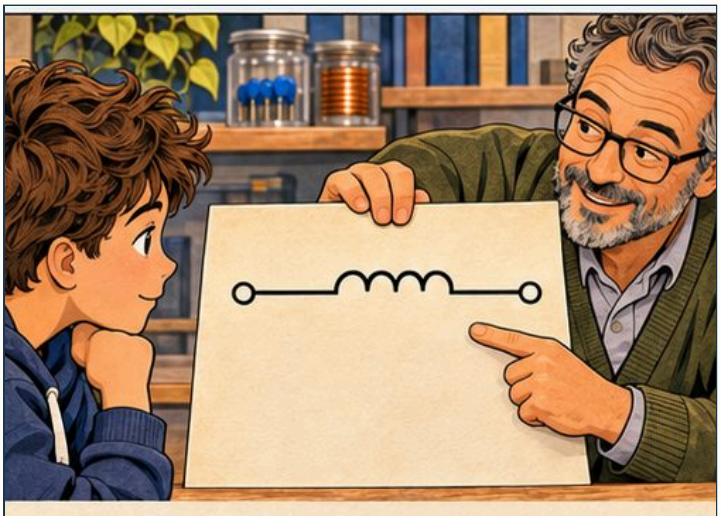
理想线圈的电抗大小随频率升高而增大。



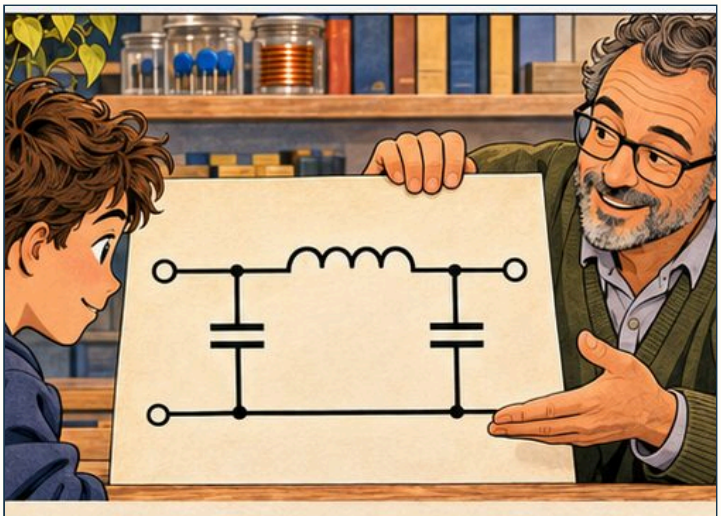
其绝对值为 XL = 2πfL。



电感量相同时，高频遇到的电抗更大。

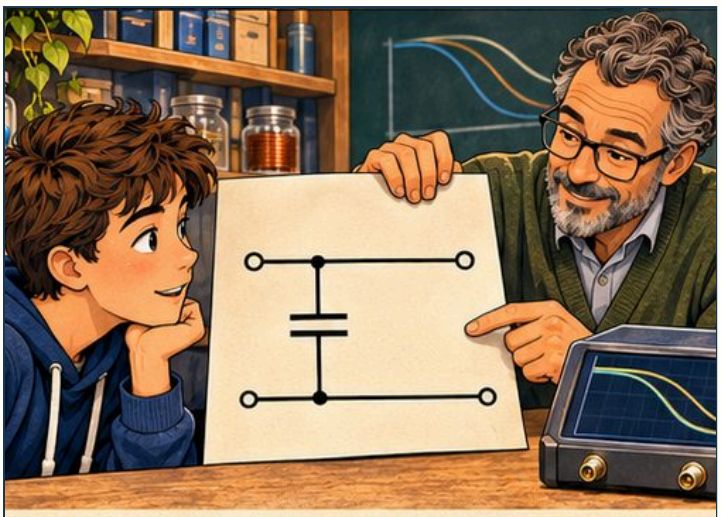


在他们的滤波器中，线圈位于信号路径上。

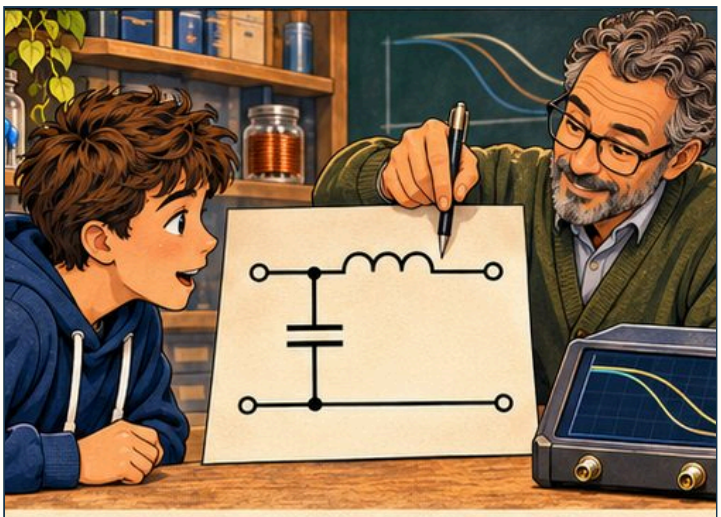


这两类元件将共同发挥作用。

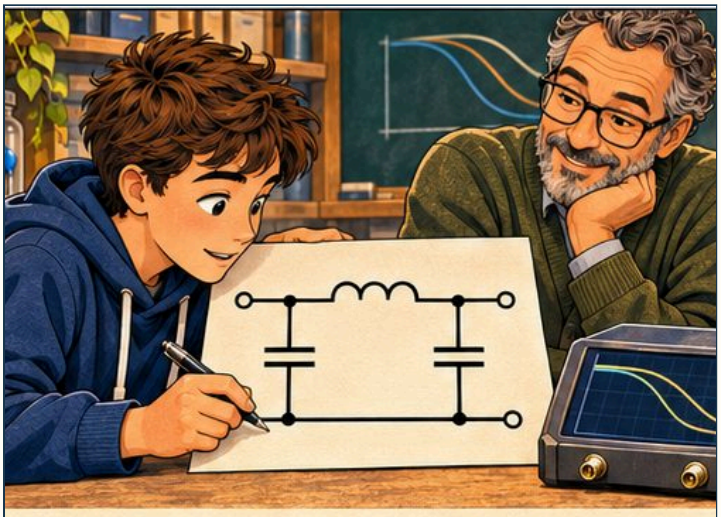
电路图变成 π 形



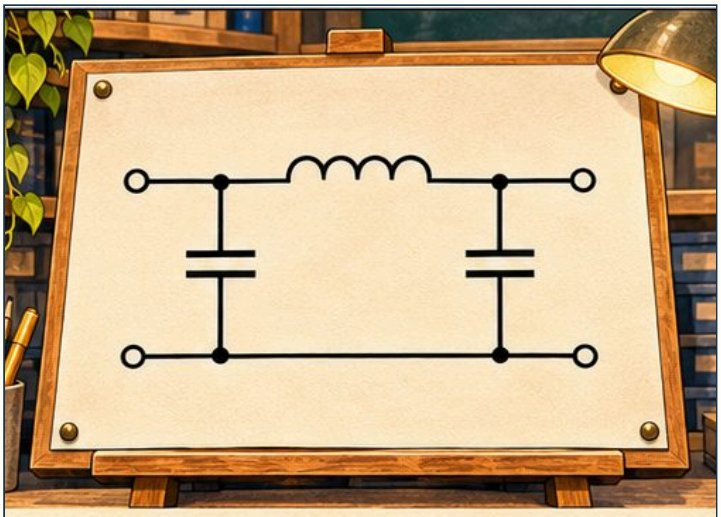
输入端接到第一个通向公共地的电容。



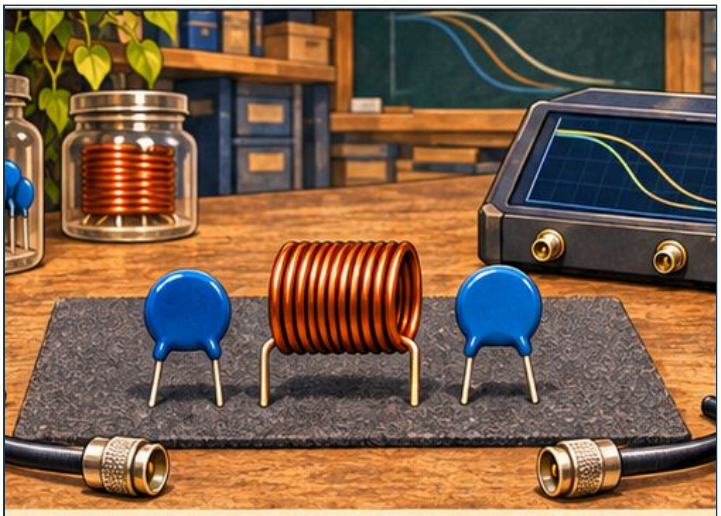
然后，一个线圈串联连接输入端与输出端。



第二个电容把输出端接到同一个公共地。



线圈两边各有一条向下的支路。

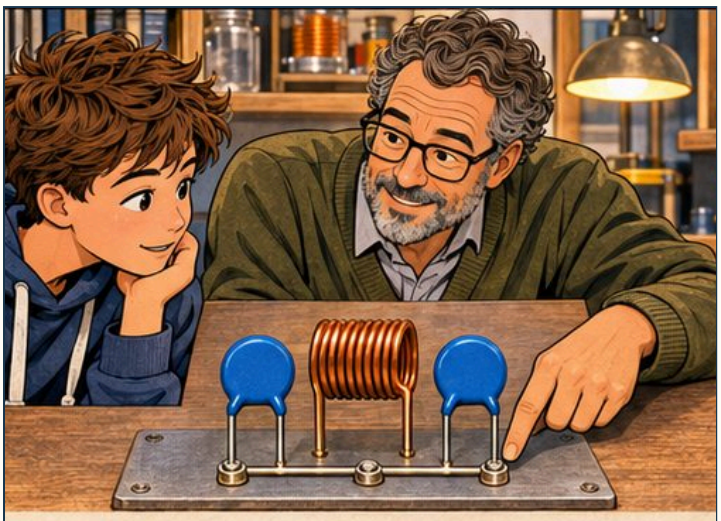


这种布局让人联想到希腊字母 π。

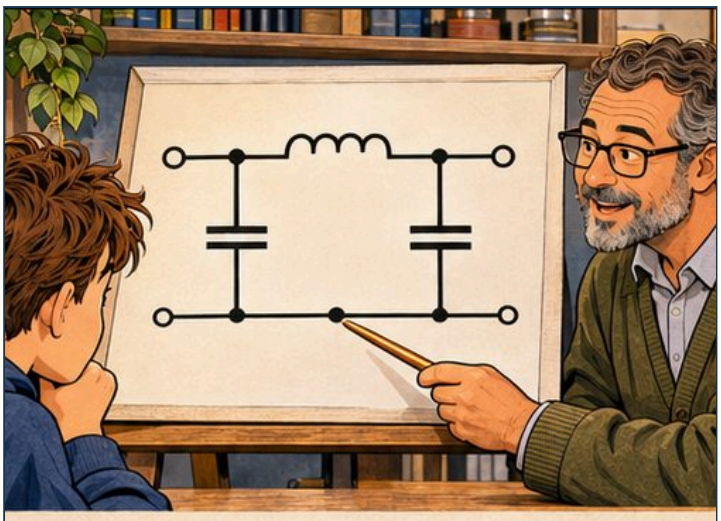


少年用铅笔逐一追踪连接。

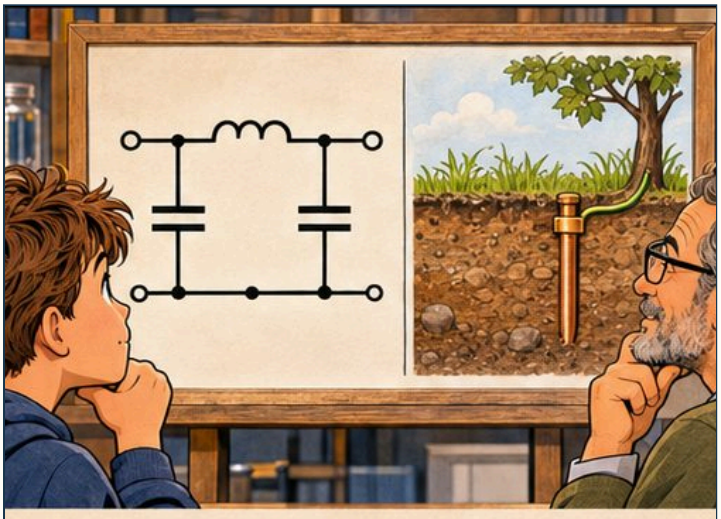
电路图中的地



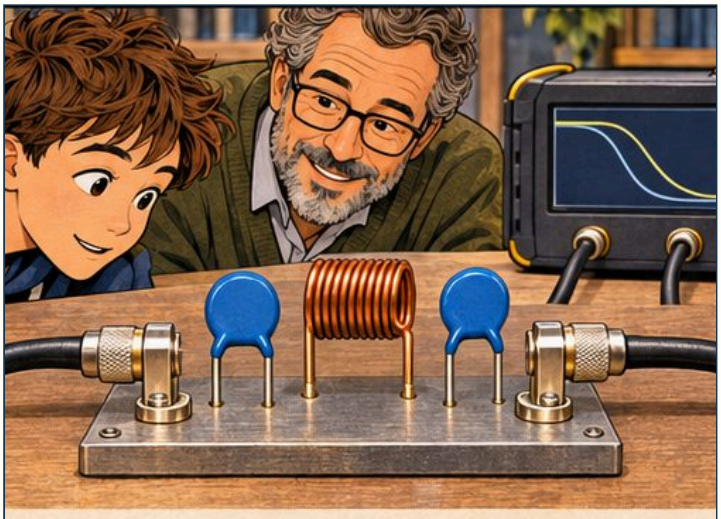
两个电容共用同一个电气参考点。



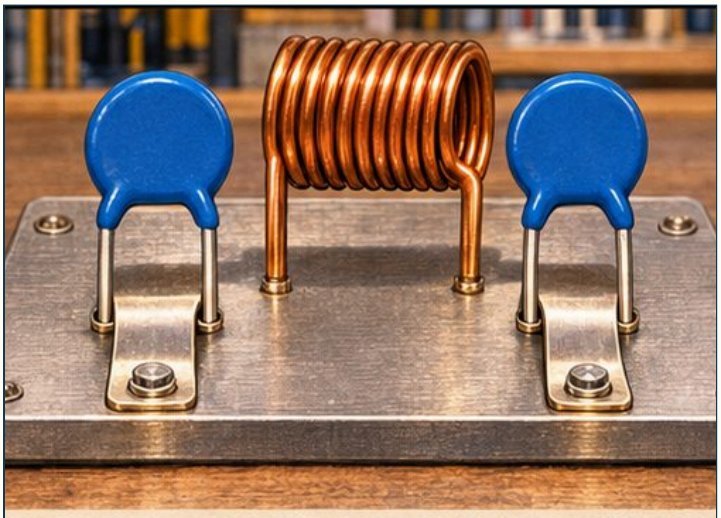
这里的地符号代表电路的这个参考点。



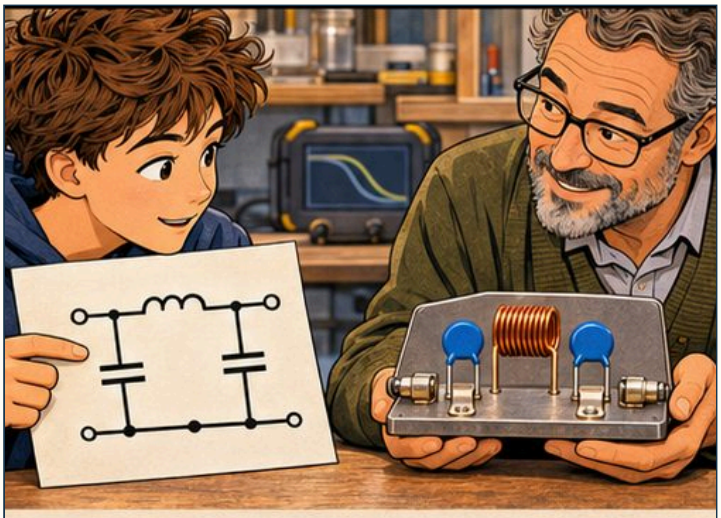
它并不自动意味着连接到大地。



同轴电缆的屏蔽层按设计接到这个公共地。



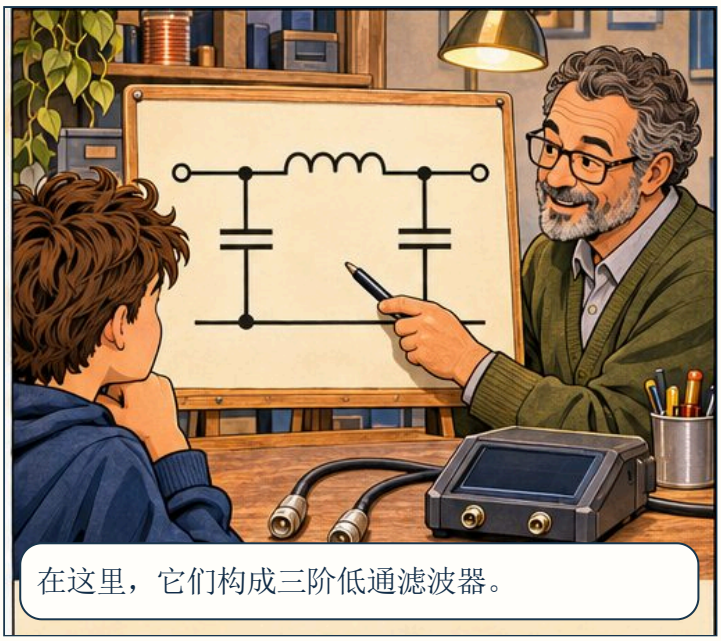
较短的连接能限制某些寄生效应。



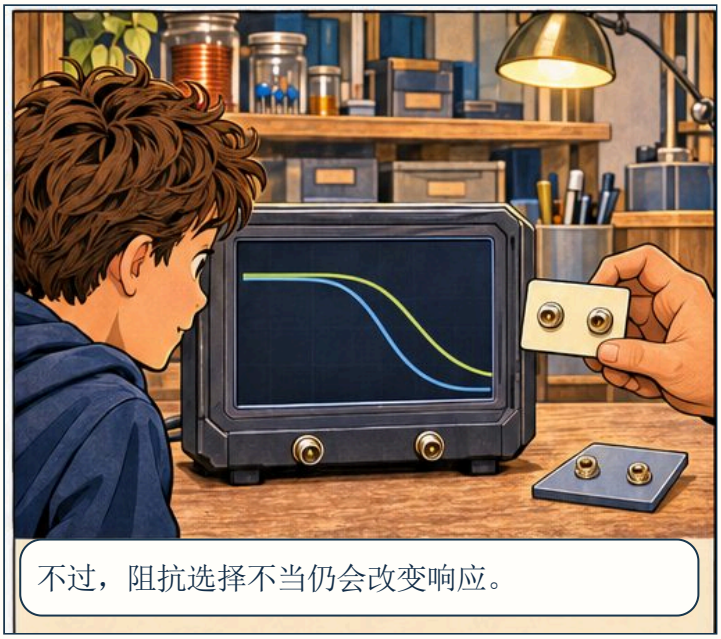
少年分清了符号与实际做法。

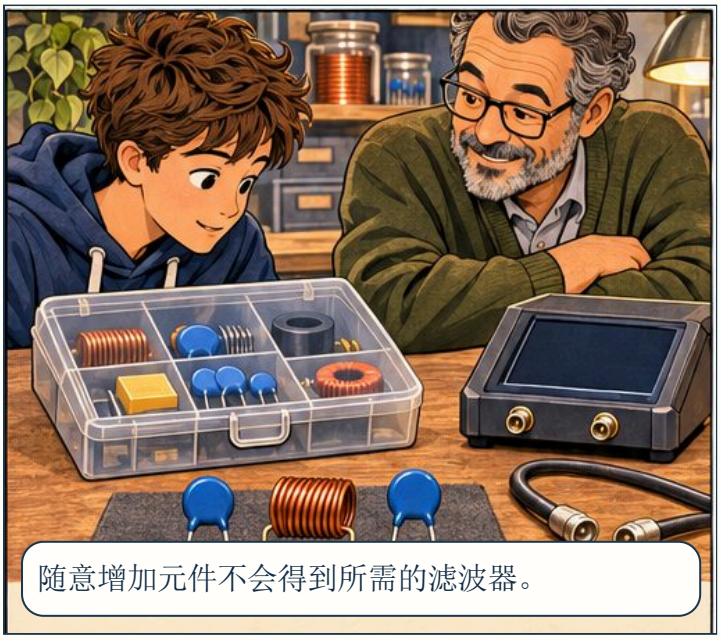
三个元件，一个阶数

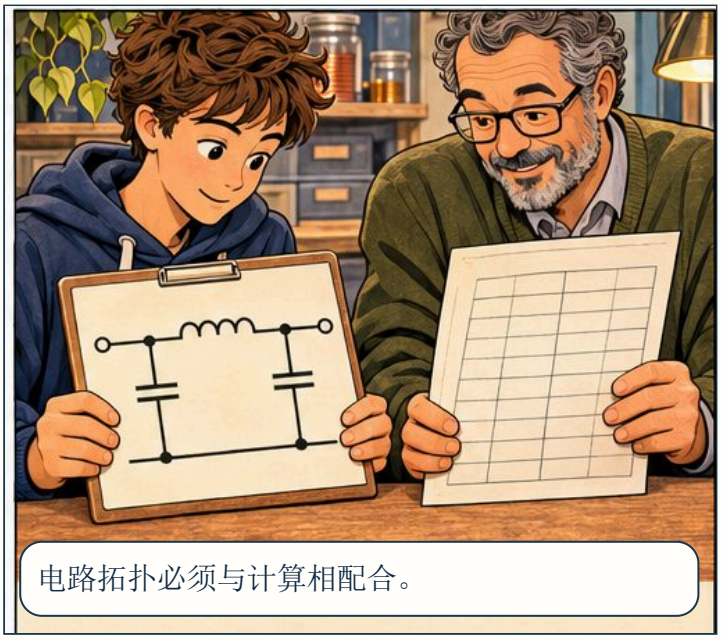

这个理想网络包含三个电抗元件：C、L 和 C。


在这里，它们构成三阶低通滤波器。


阶数还决定模型远离截止处的渐近斜率。


不过，阻抗选择不当仍会改变响应。

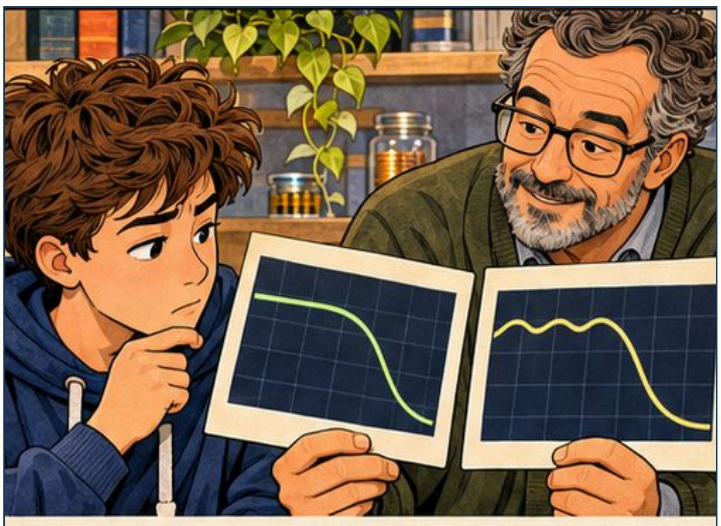

随意增加元件不会得到所需的滤波器。


电路拓扑必须与计算相配合。

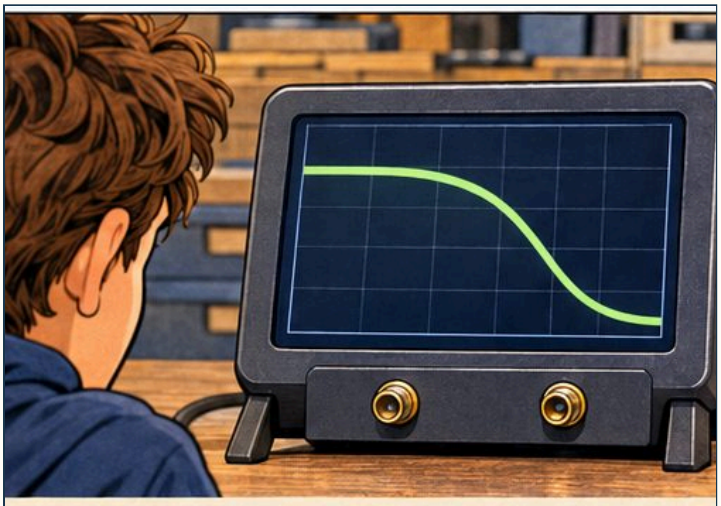
为什么选择巴特沃思？



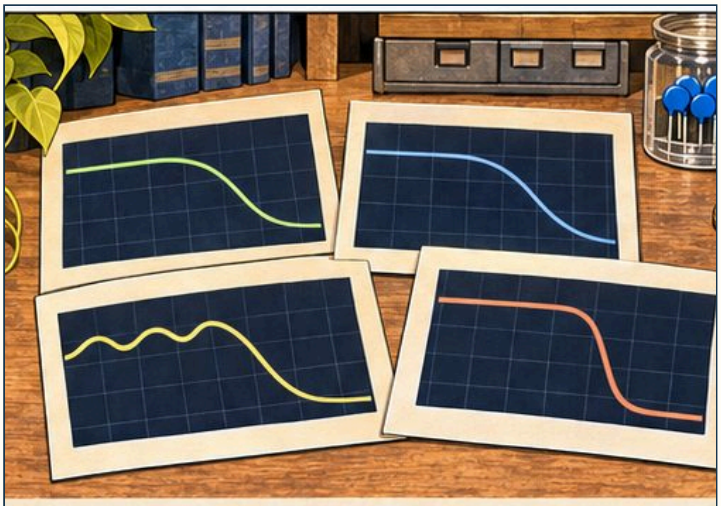
巴特沃思响应在通带内具有最大平坦特性。



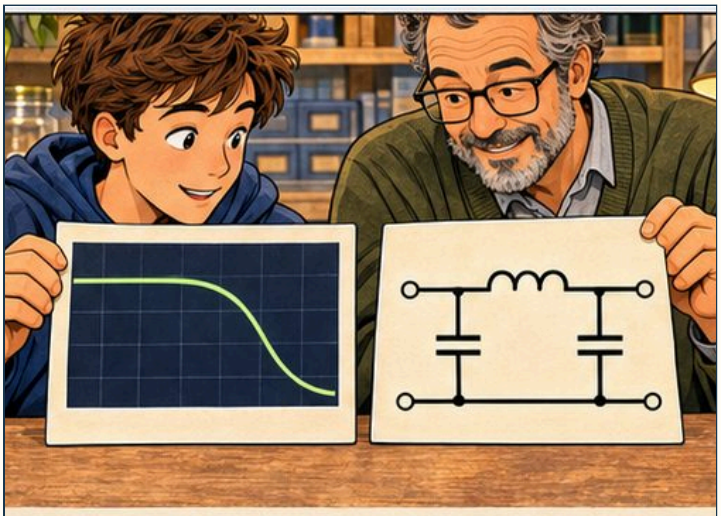
理想模型在这个频带内没有纹波。



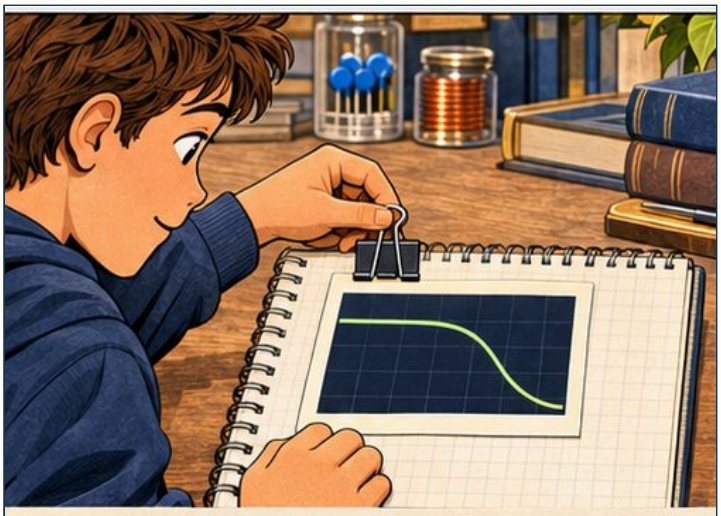
过渡仍然是渐进的，并具有特定曲率。



其他响应会采用不同的折中。



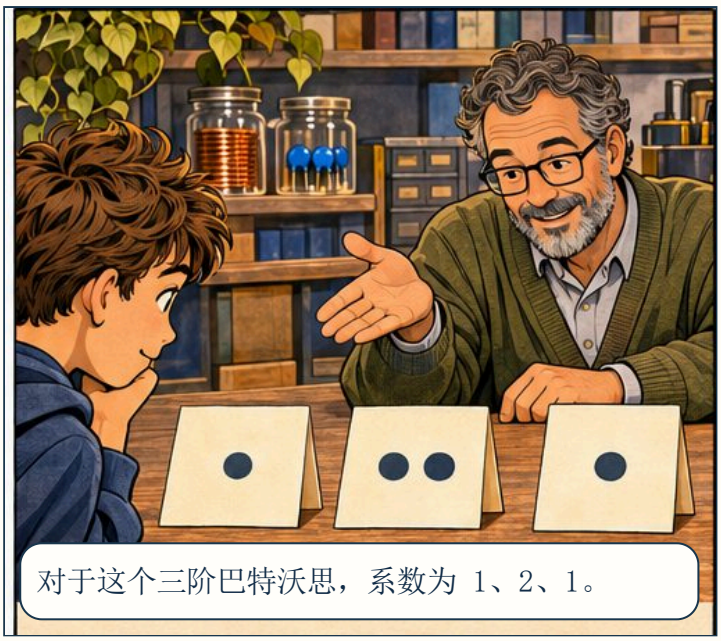
他们选择这一类型，让第一次设计更容易理解。



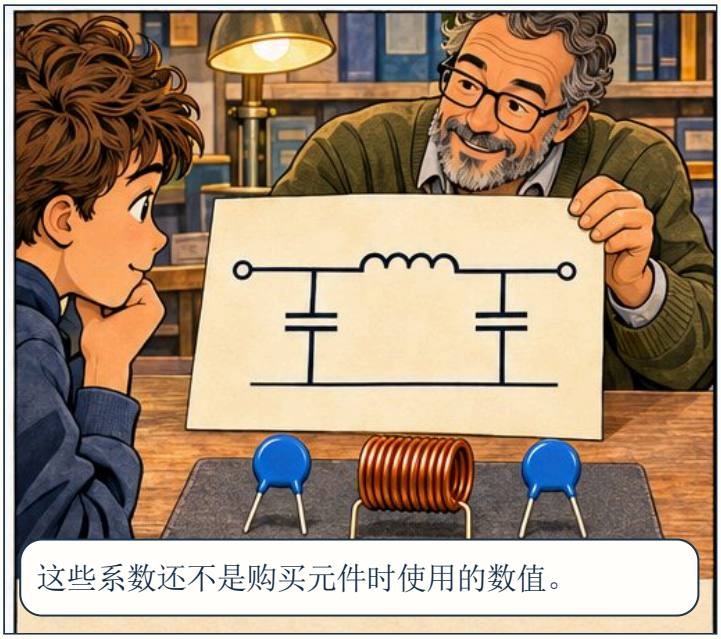
因此，这个名称比单说“低通”更具体。

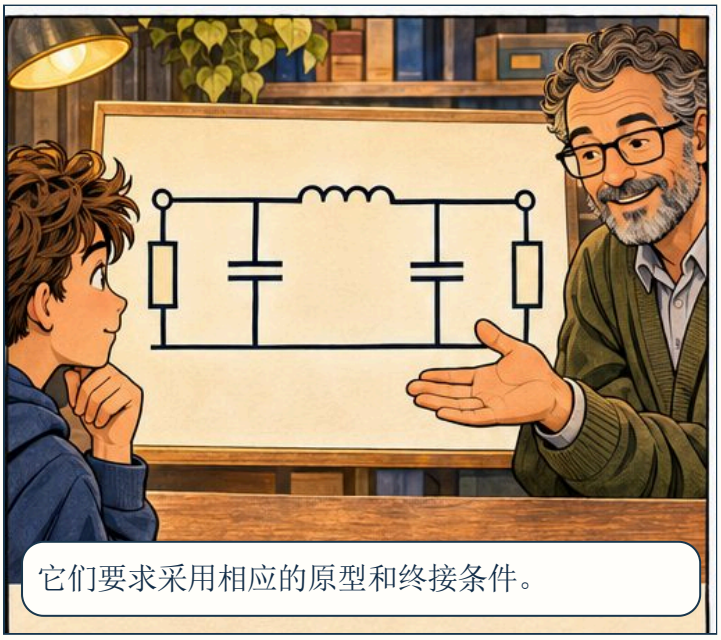
从原型开始


归一化原型提供设计所需的系数。


对于这个三阶巴特沃思，系数为 1、2、1。

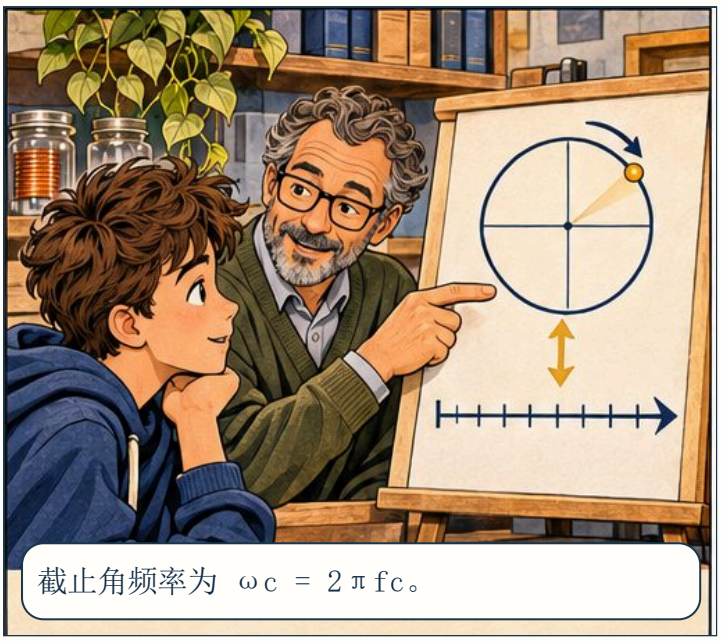

它们依次对应电容、线圈、电容。


这些系数还不是购买元件时使用的数值。


它们要求采用相应的原型和终接条件。


接下来还要确定频率与阻抗的缩放。

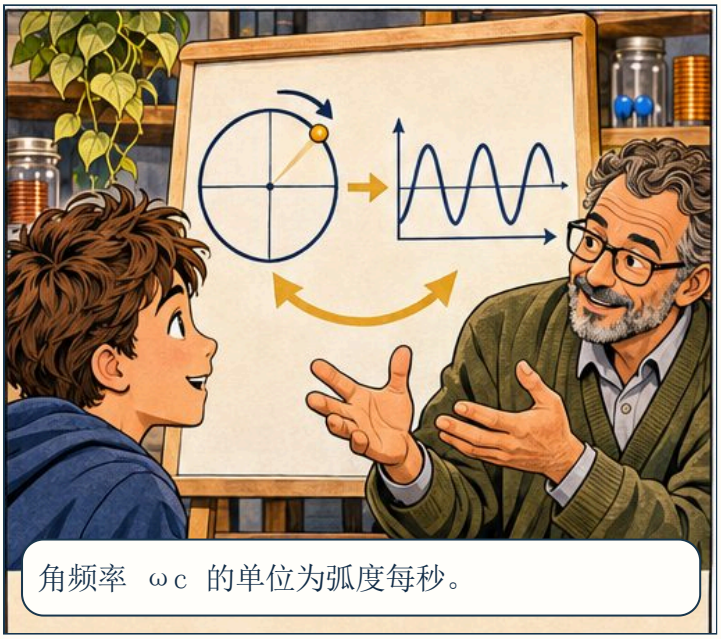
改变尺度



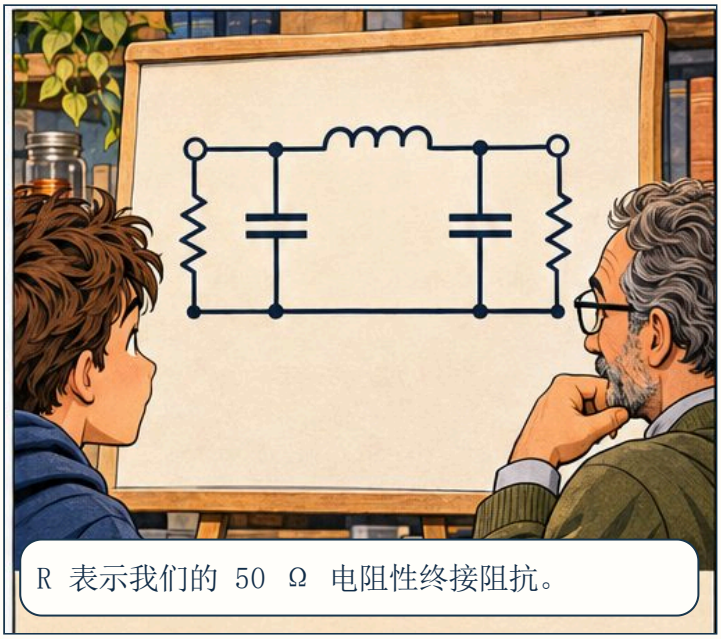
截止角频率为 ωc = 2πfc。



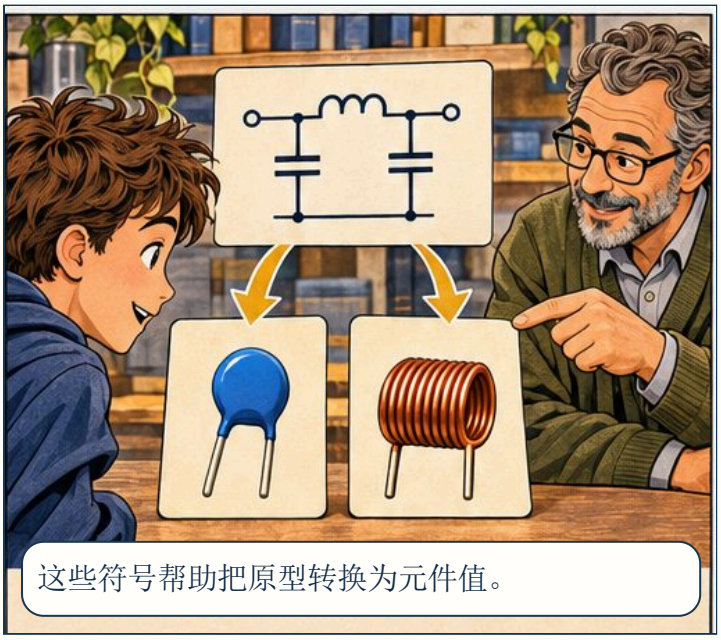
这里，fc 表示以赫兹为单位的截止频率。



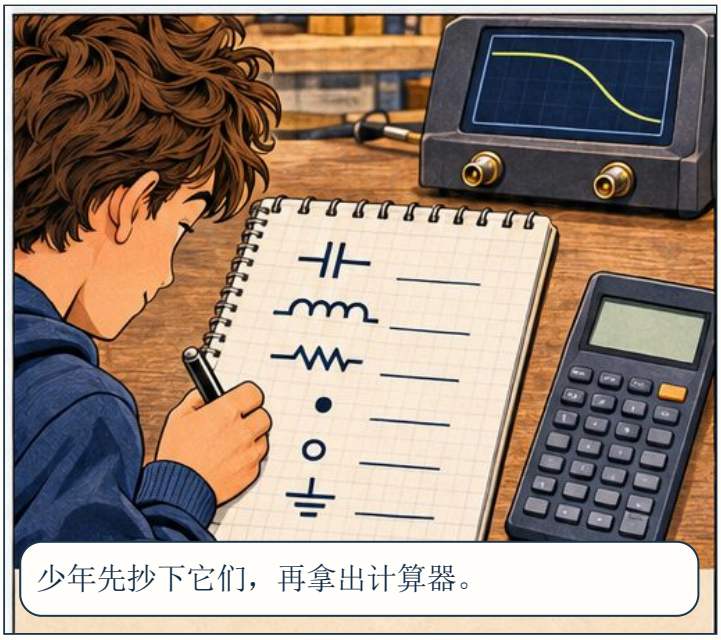
角频率 ωc 的单位为弧度每秒。



R 表示我们的 50 Ω 电阻性终接阻抗。



这些符号帮助把原型转换为元件值。

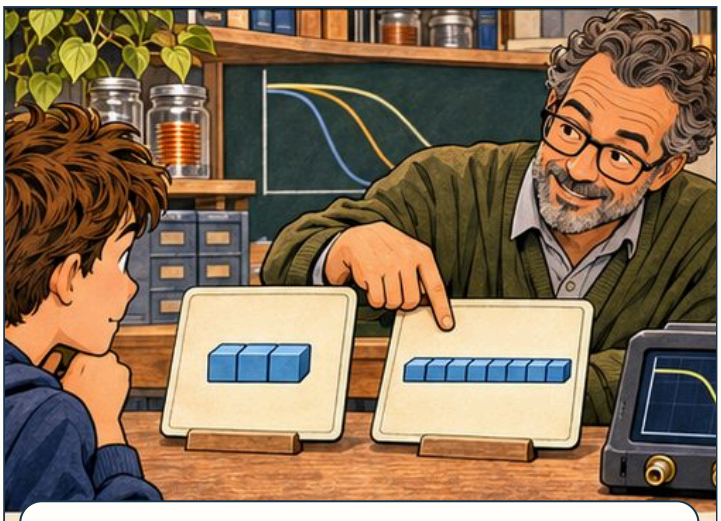


少年先抄下它们，再拿出计算器。

先看单位，再看数字



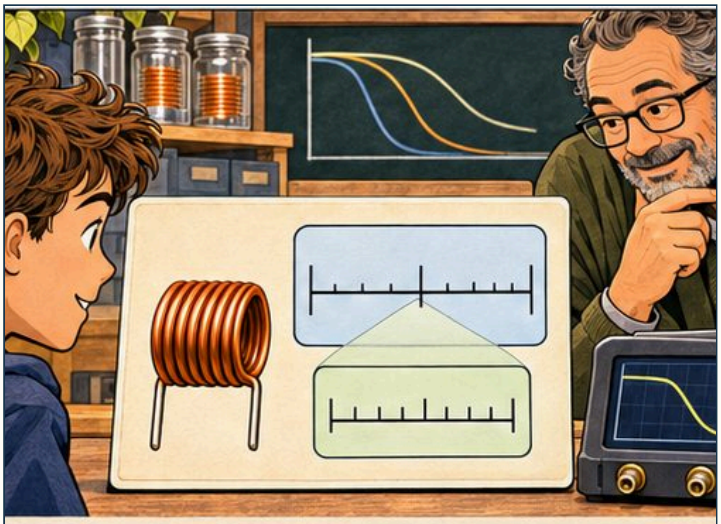
一兆赫等于一百万赫兹。



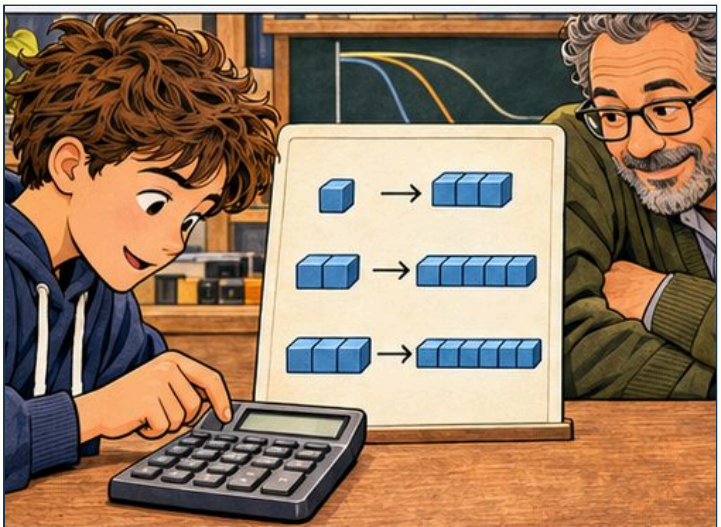
因此，10 MHz 的截止频率等于 10 000 000 Hz。



一皮法等于 10^{-12} F。



一微亨等于 10^{-6} H。

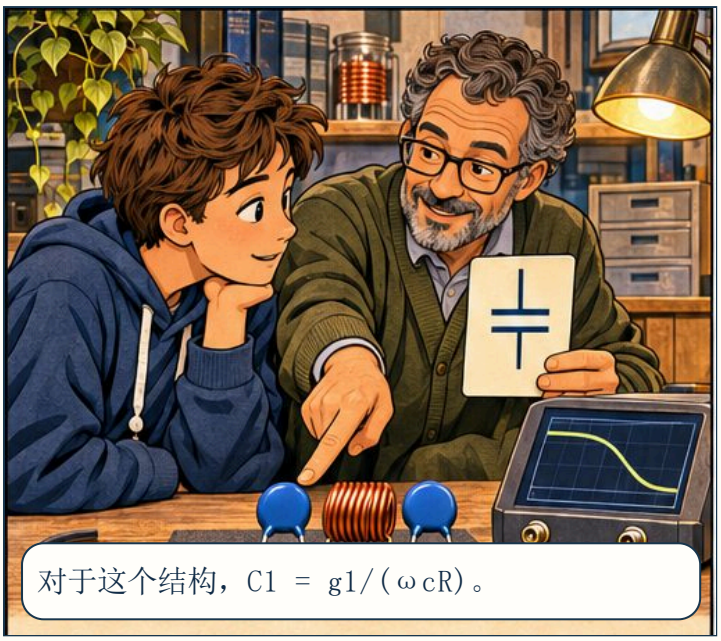


公式首先使用基本单位。

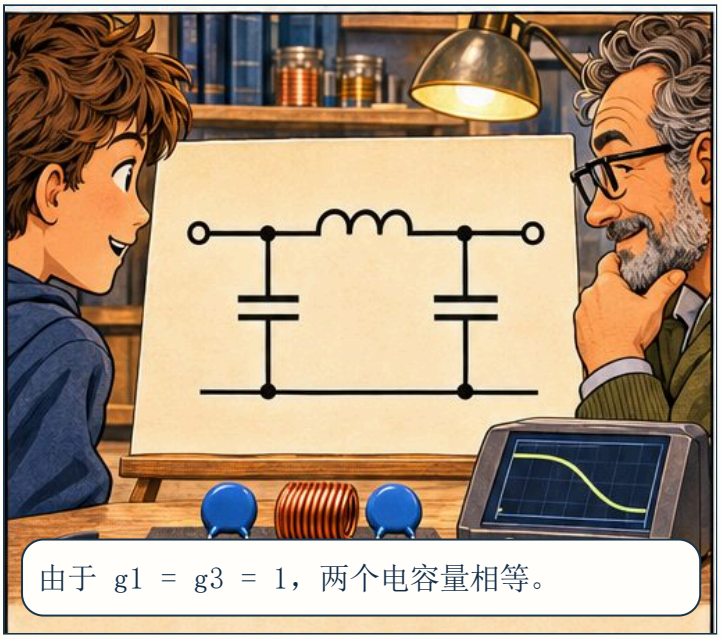


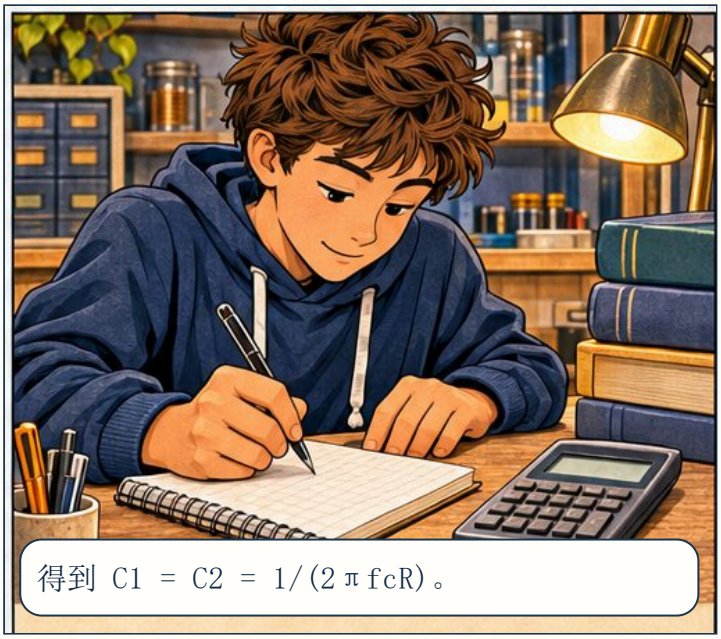
少年把单位换算写在计算旁边，方便查看。

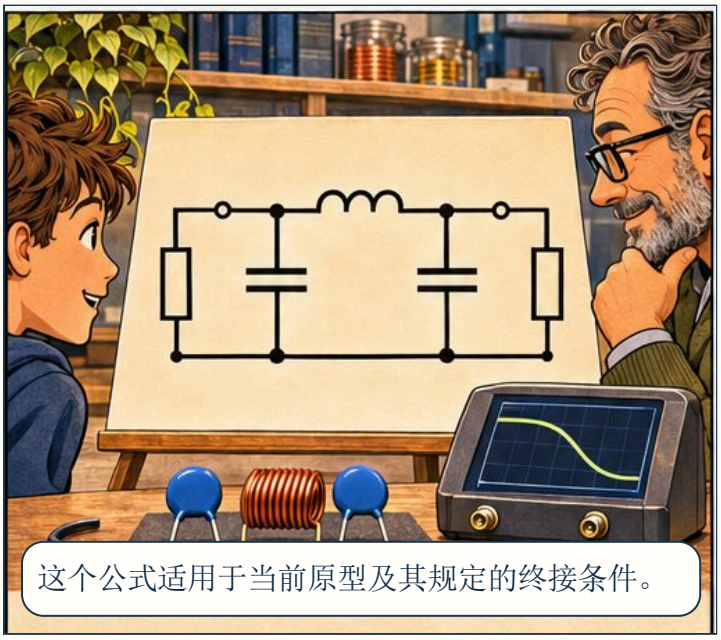
电容的计算公式


对于这个结构，C1 = g1/(ωcR)。


第三个系数给出 C2 = g3/(ωcR)。


由于 g1 = g3 = 1，两个电容量相等。


得到 C1 = C2 = 1/(2πfcR)。


这个公式适用于当前原型及其规定的终接条件。

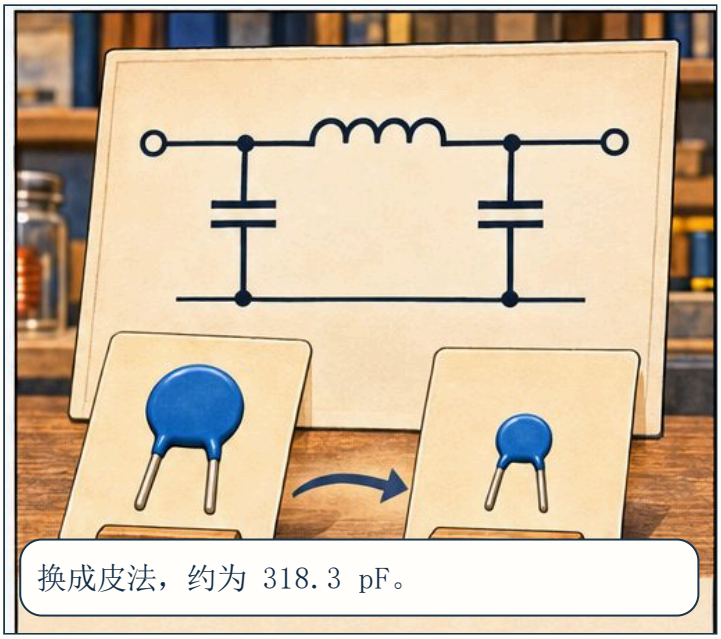

代入数值之前，少年检查每一个符号。

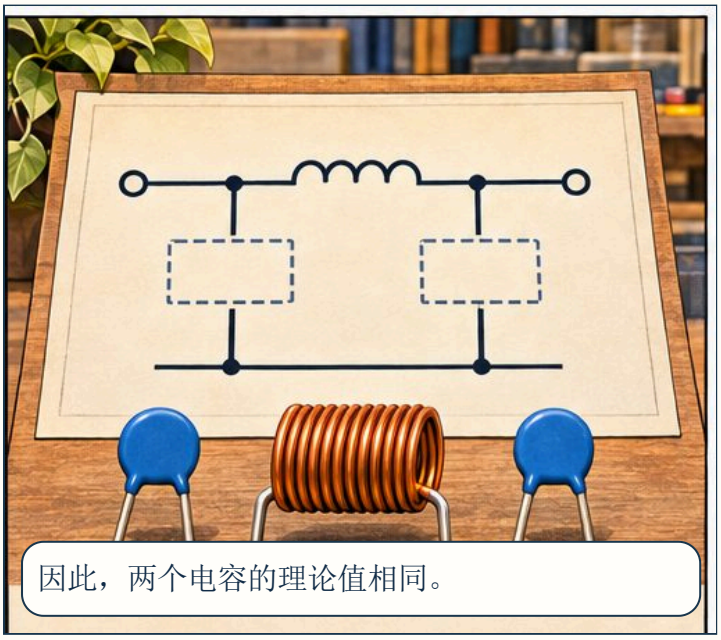
计算电容量


他们代入 fc = 10 000 000 Hz、R = 50 Ω。


分母约为 3.142 × 10⁹。

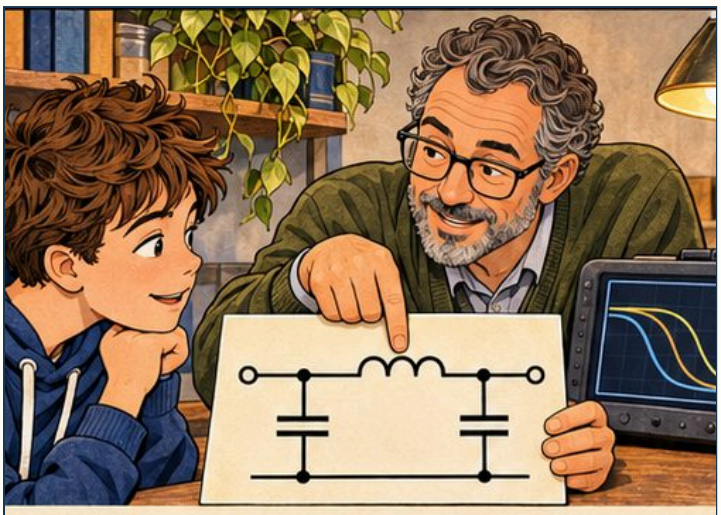

每个理想电容量约为 3.183 × 10⁻¹⁰ F。


换成皮法，约为 318.3 pF。


因此，两个电容的理论值相同。


Lucas清楚地写下结果及其单位。

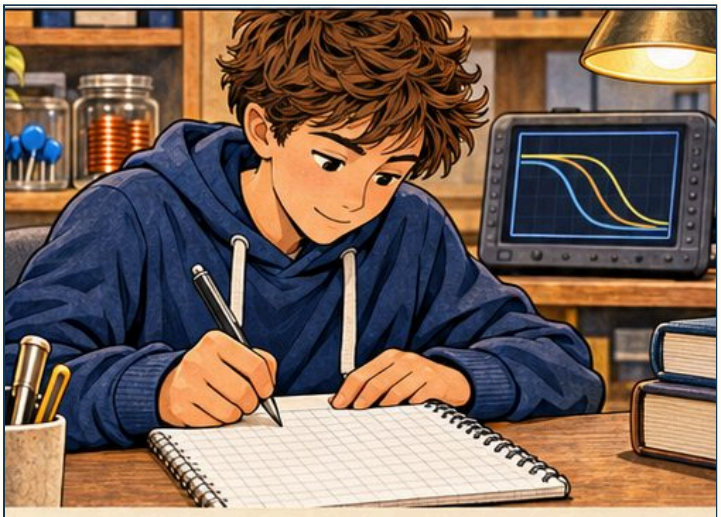
线圈的计算公式



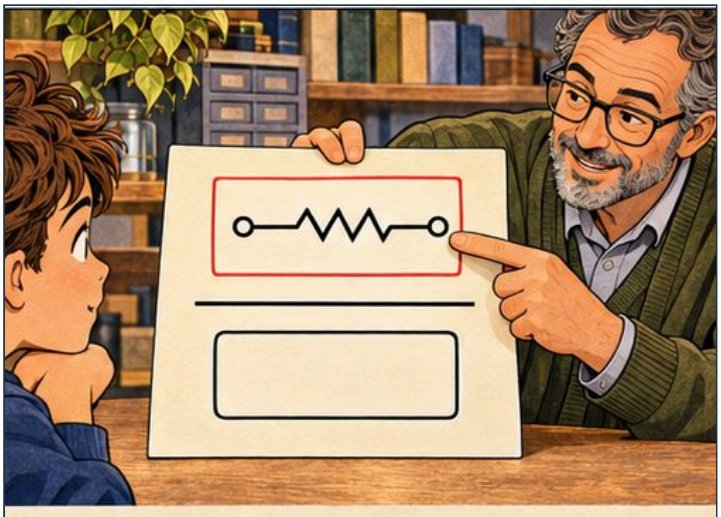
对于串联线圈，L = g2R/ωc。



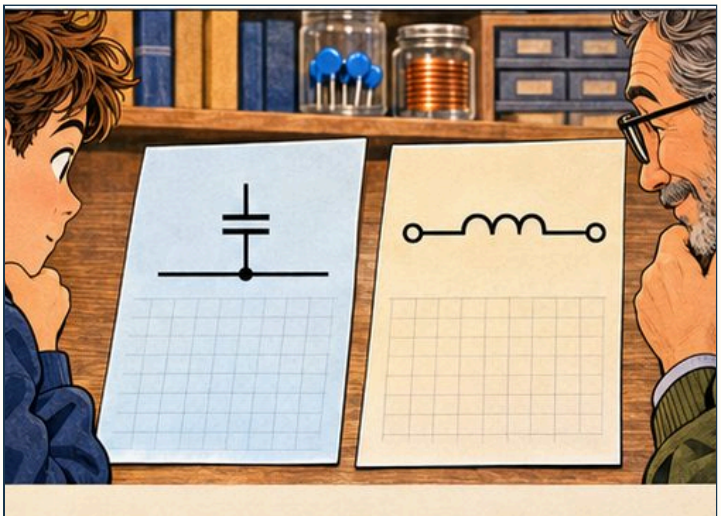
这里，中间的系数为 g2 = 2。



因此得到 L = 2R/(2πfc)。



这次，终接电阻位于分子。

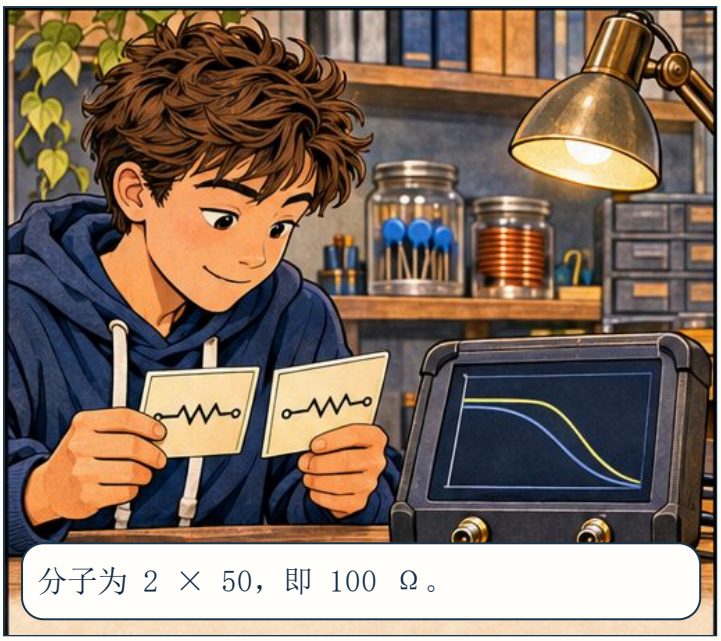


少年把这个公式与电容公式进行比较。

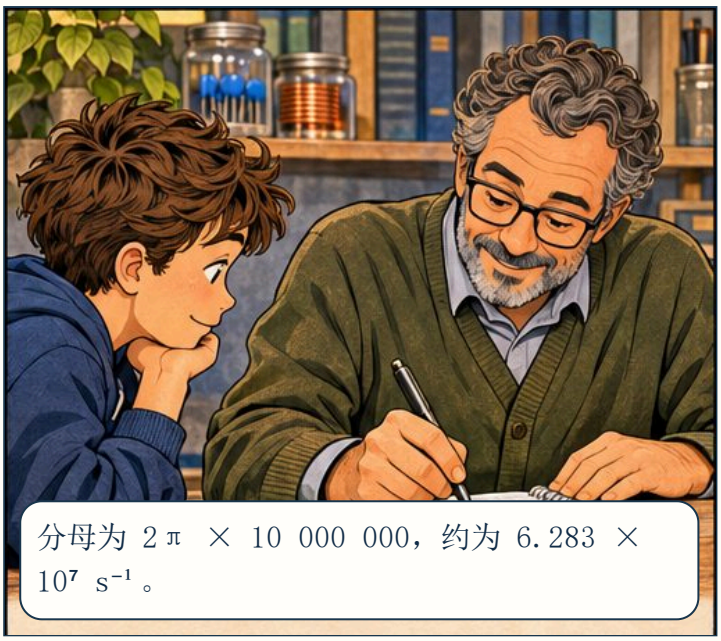


外形相似并不能代替仔细复查。

计算电感量



分子为 2 × 50，即 100 Ω。



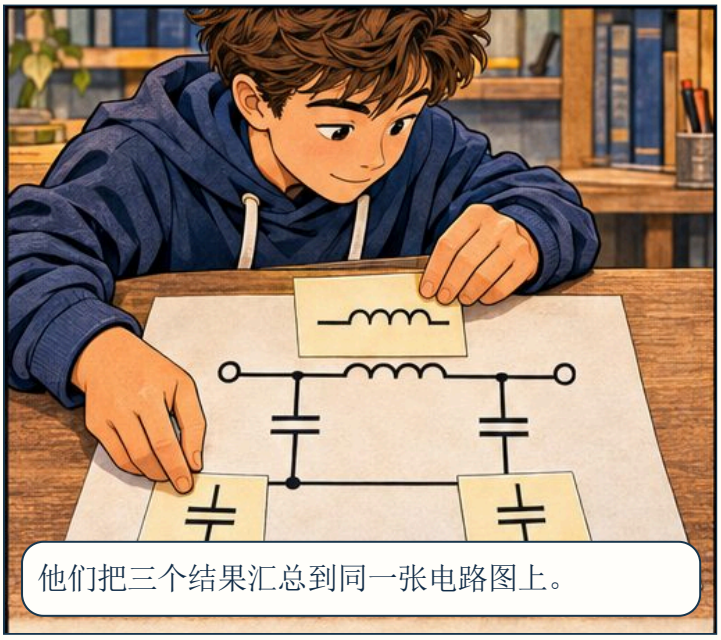
分母为 2π × 10 000 000，约为 6.283 × 10^{7} s^{-1}。



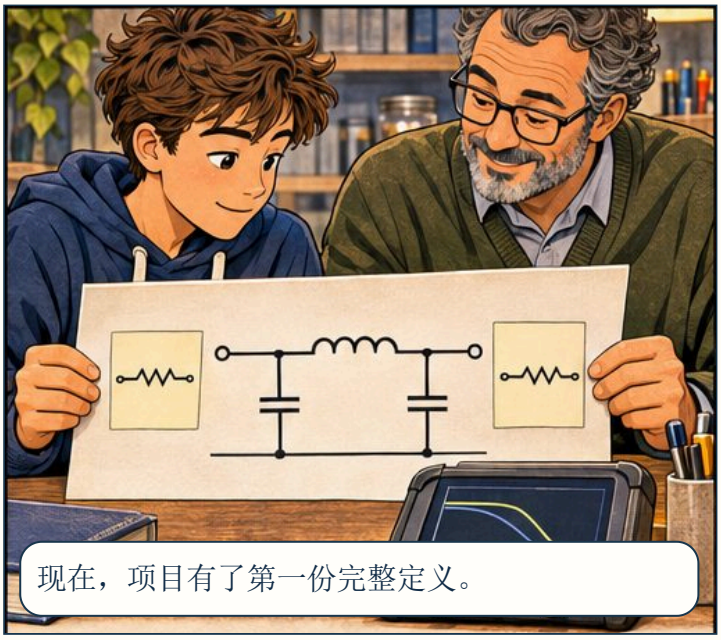
计算结果约为 1.592 × 10^{-6} H。



因此，理想线圈的电感量约为 1.59 μH。



他们把三个结果汇总到同一张电路图上。

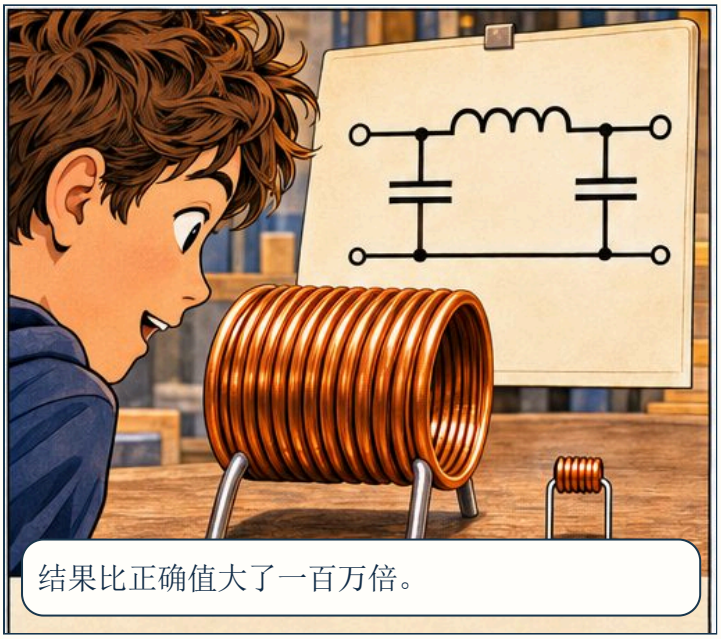


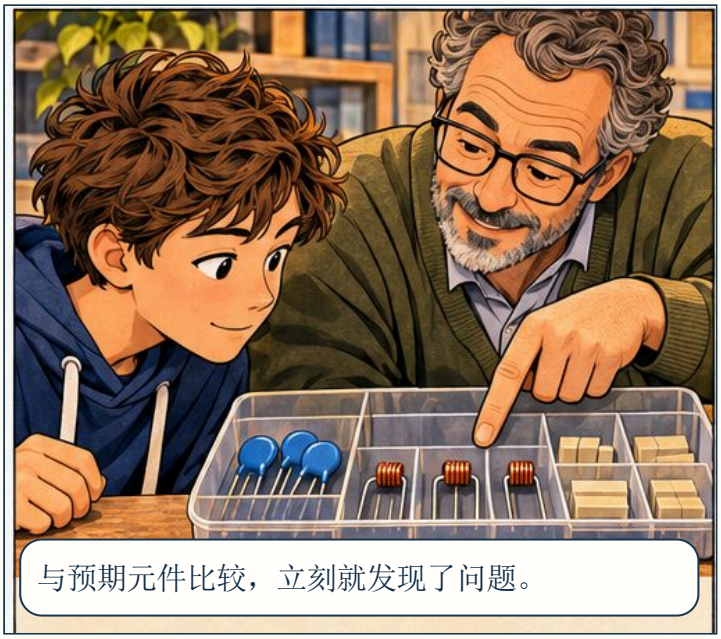
现在，项目有了第一份完整定义。

差了一百万倍

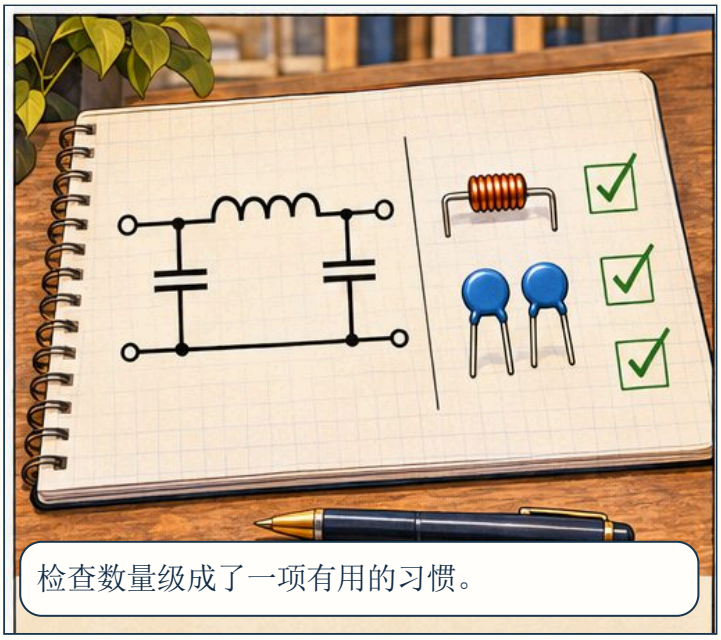

少年接着试着快速重新输入计算。


他输入了 10，而不是 10 000 000。


结果比正确值大了一百万倍。


与预期元件比较，立刻就发现了问题。


他修正输入，再独立计算一次。


检查数量级成了一项有用的习惯。

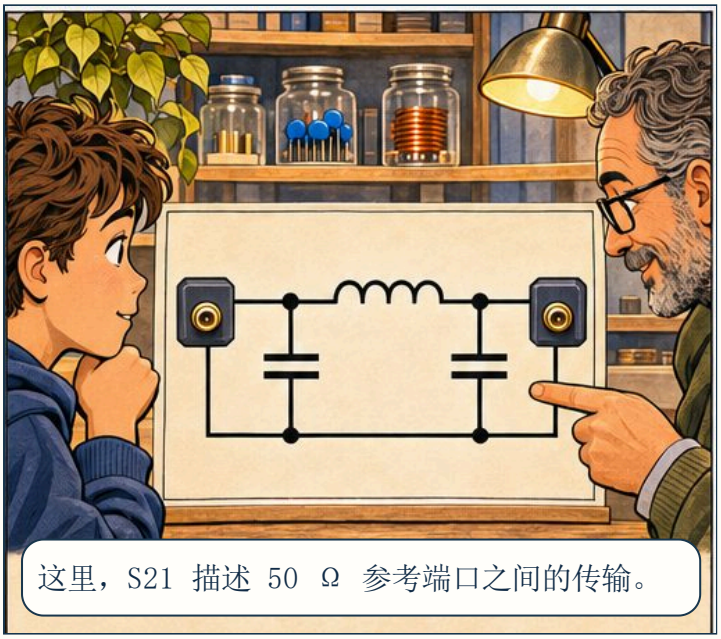
预测整条曲线



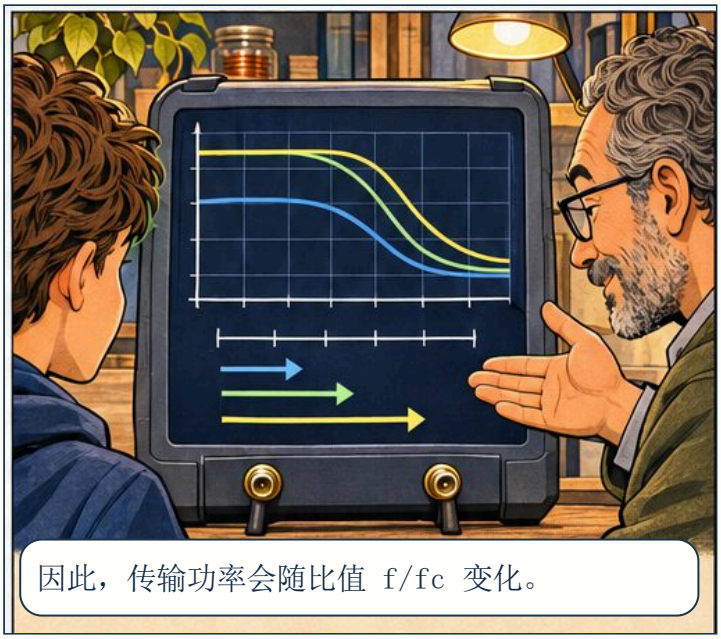
三个数值还不能描述整个响应。



在理想模型中，S21 模的平方为 1/[1 + (f/fc)⁶]。



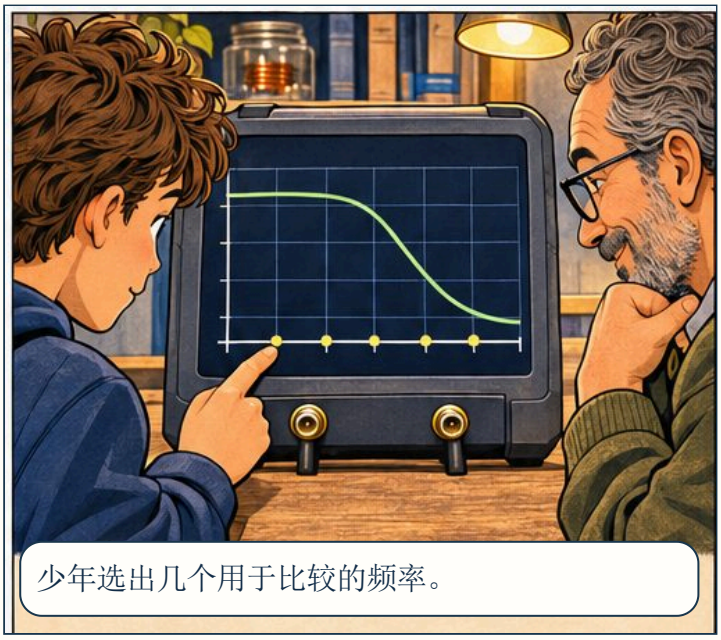
这里，S21 描述 50 Ω 参考端口之间的传输。



因此，传输功率会随比值 f/fc 变化。



理论曲线是测量前的参考。



少年选出几个用于比较的频率。

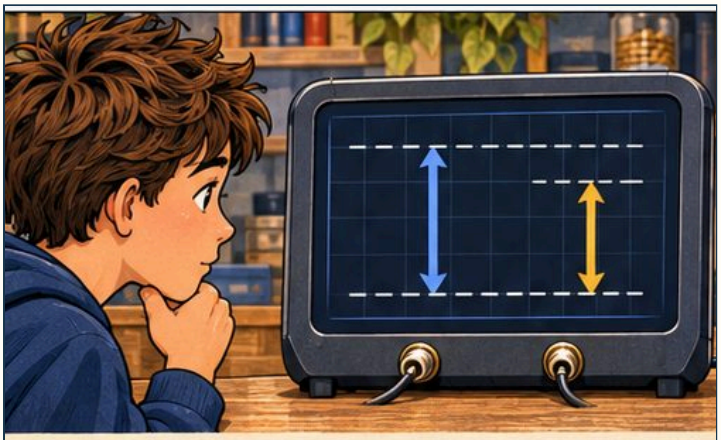
负三分贝是什么意思？



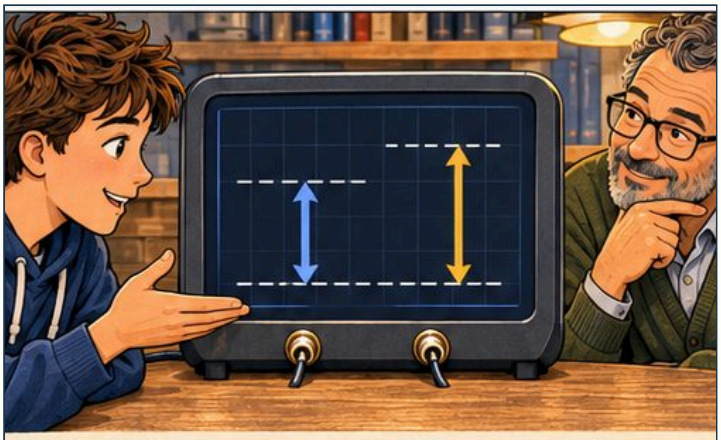
在 f = fc 时，理想的传输功率比为 1/2。



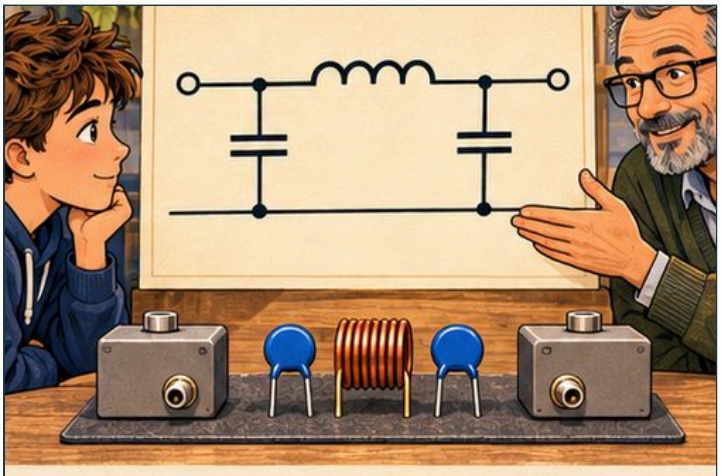
换成分贝，10 log10(1/2) 约为 -3.01 dB。



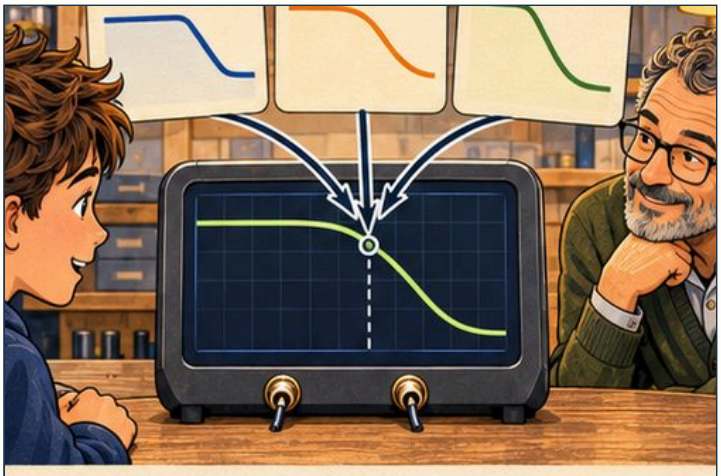
此时，S21 的模约为 0.707。



因此，这个幅度并不是一半。



计算采用了适当的 50 Ω 参考条件。

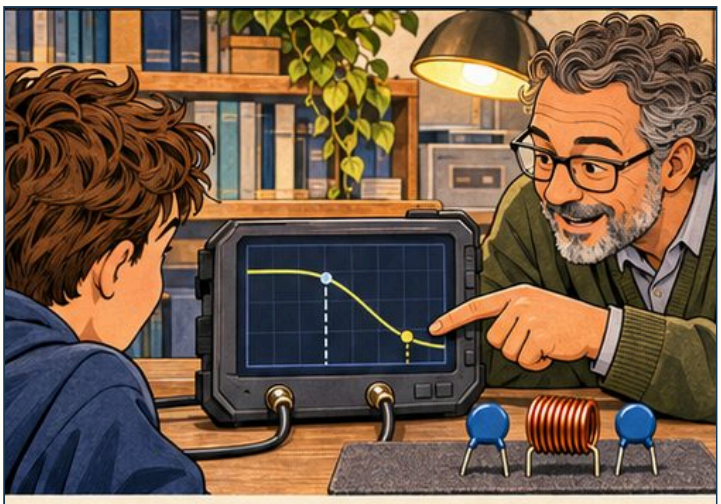


少年把同一个曲线点的三种表达联系起来。

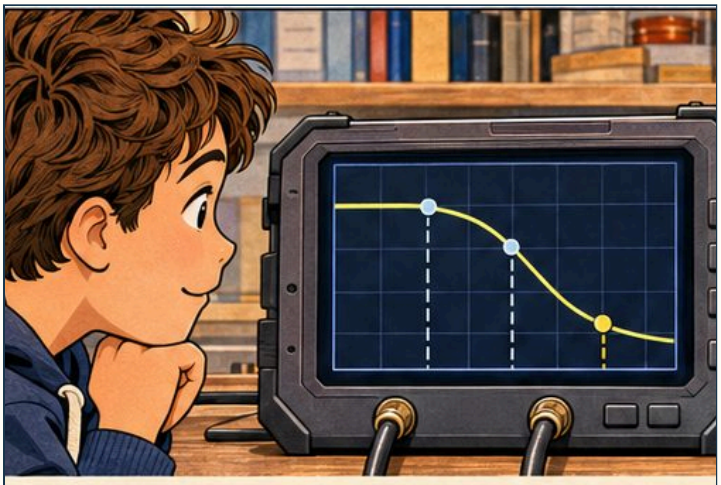
超过截止频率



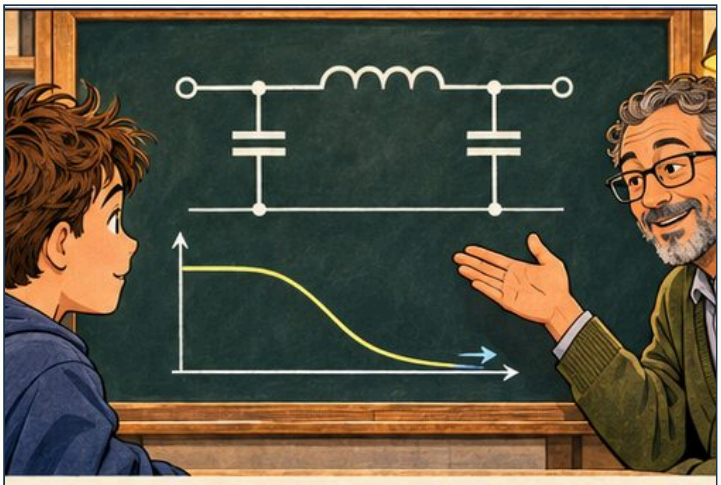
在 20 MHz 时，f/fc 为 2。



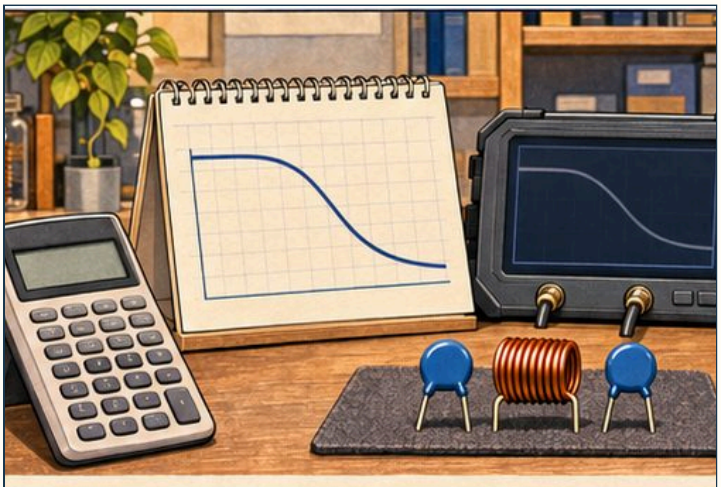
理想传输约为 -18.13 dB。



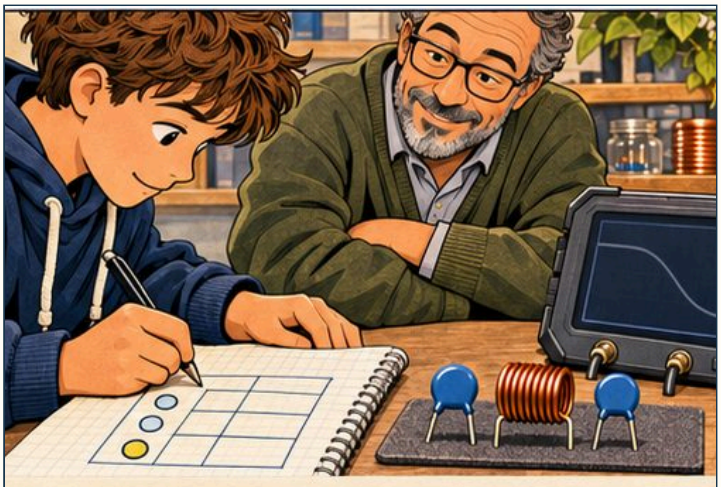
在 30 MHz 时，f/fc 为 3：约为 -28.63 dB。



衰减增大，但仍是有限的。

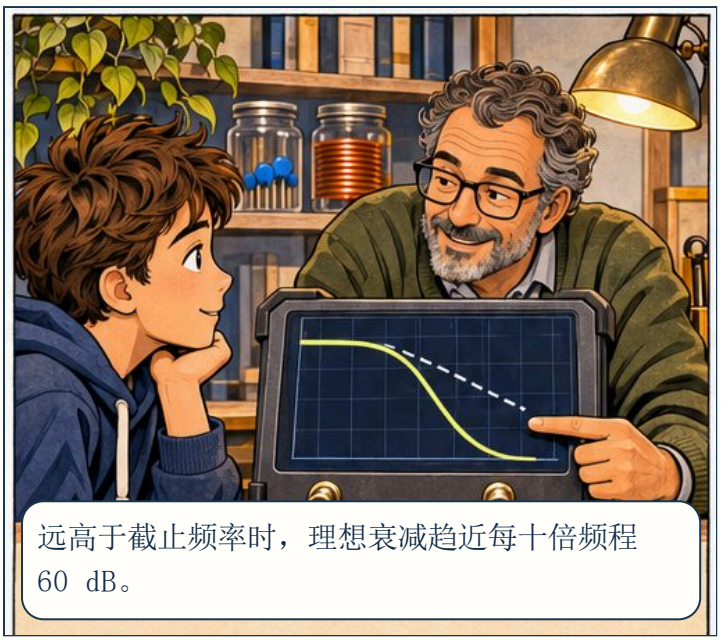


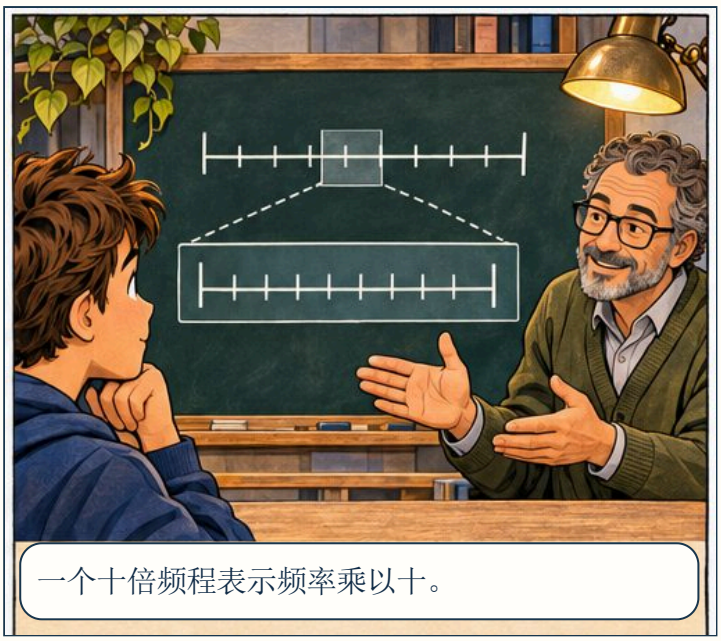
这些数字是计算值，不是他们电路的实测值。



少年把它们填入预测栏。

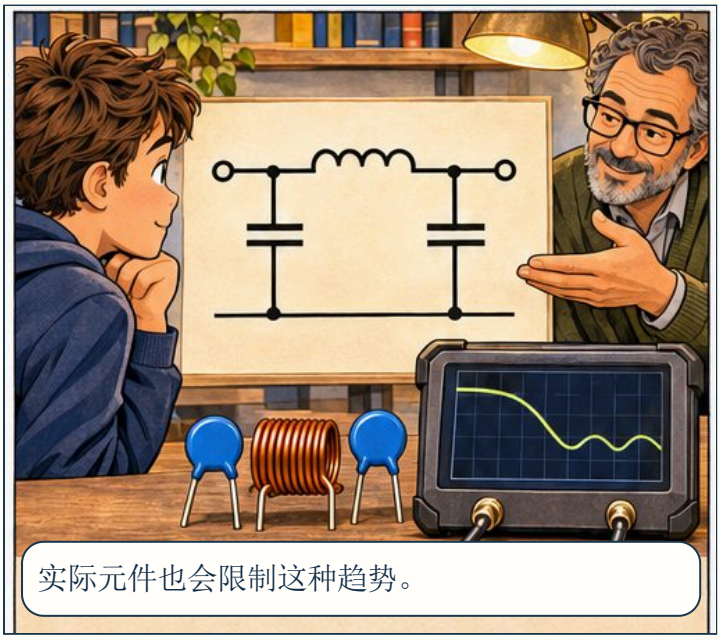
斜率并不是保证


远高于截止频率时，理想衰减趋近每十倍频程 60 dB。


一个十倍频程表示频率乘以十。

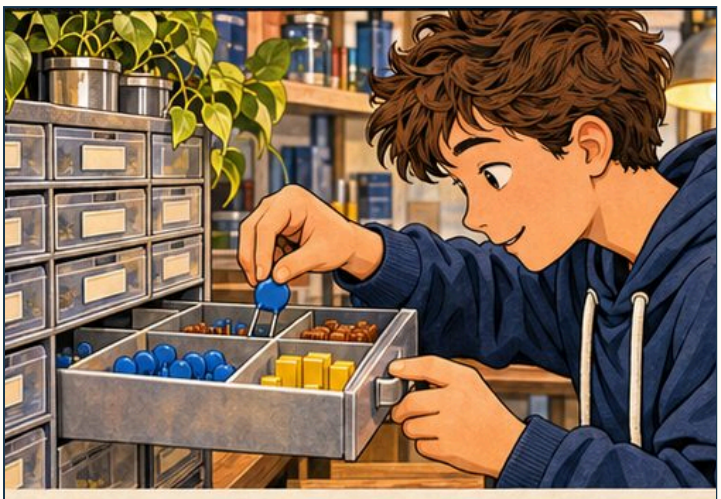

这个渐近斜率属于三阶模型。


在截止频率附近，曲线并不是直线。

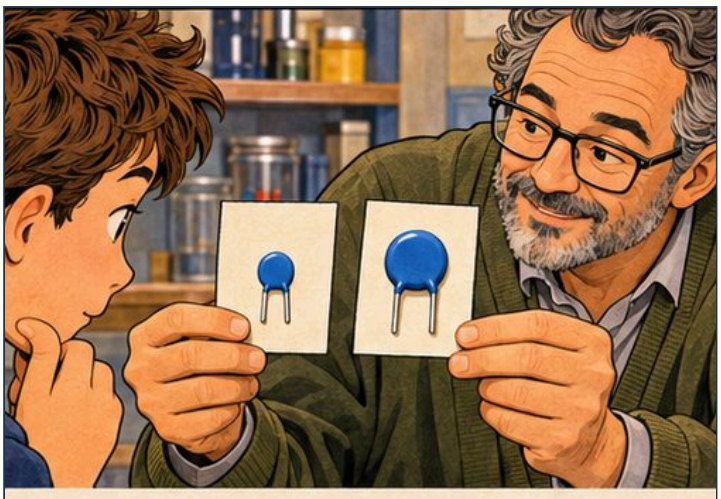

实际元件也会限制这种趋势。


少年不会把规则延伸到适用条件之外。

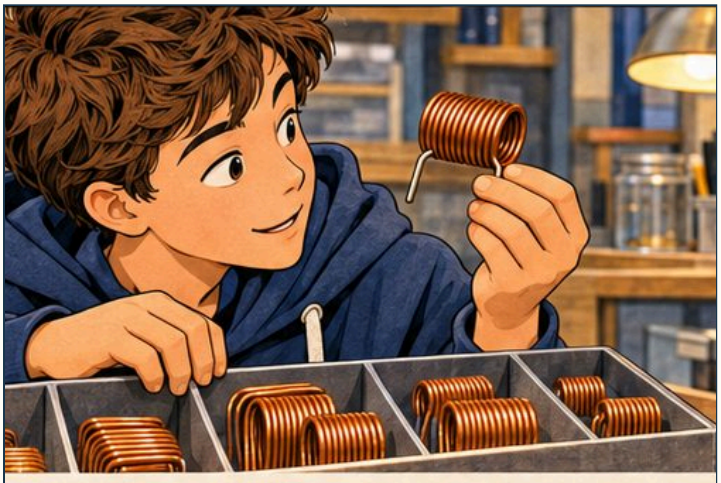
可以买到的数值



抽屉里不一定有 318.3 pF 的电容。



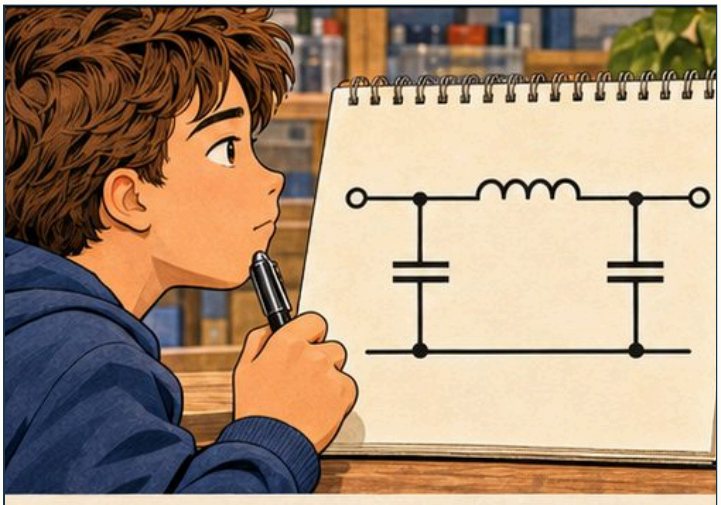
常见的 330 pF 并不等于这个值。



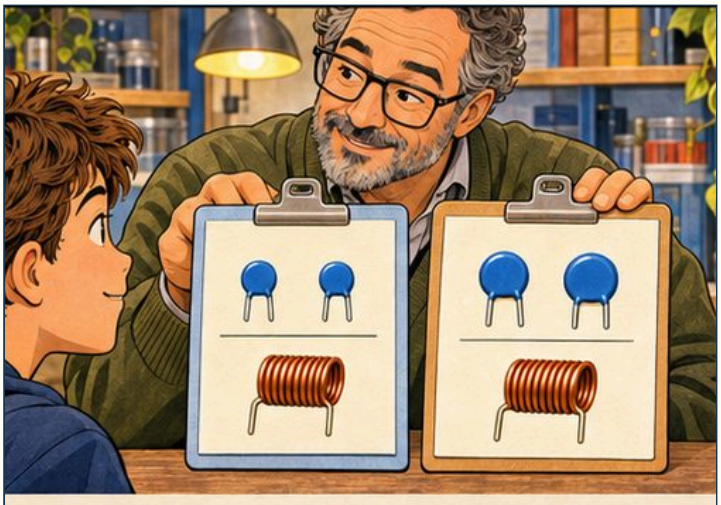
1.6 μH 的线圈接近他们的计算值。



选择这些数值后，必须重新计算或仿真响应。

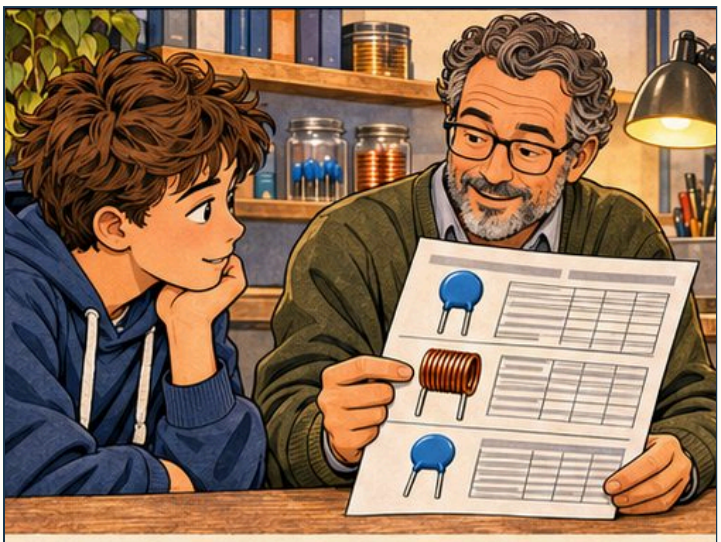


不能自动把这个电路称为“恰好 10 MHz”。



少年分别保存理想值与选用值。

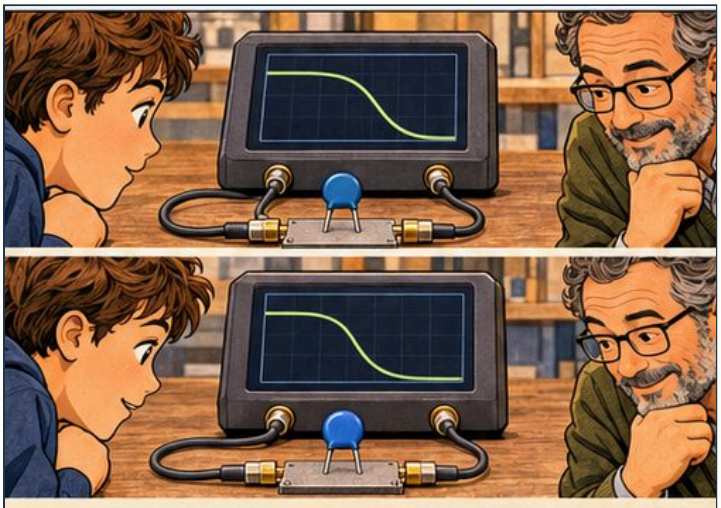
每个元件都有容差



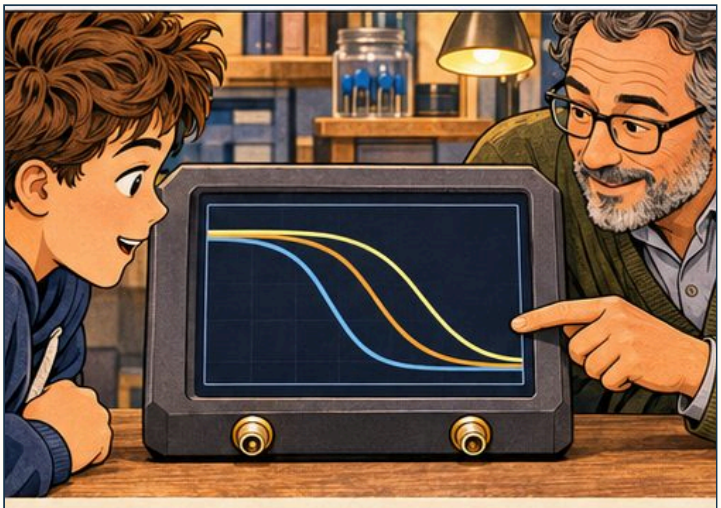
标称值并不是有保证的精确值。



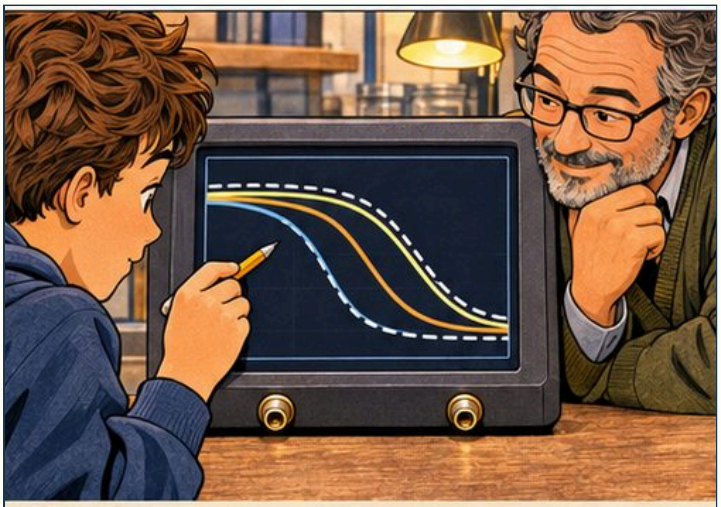
电容和线圈的容差都很重要。



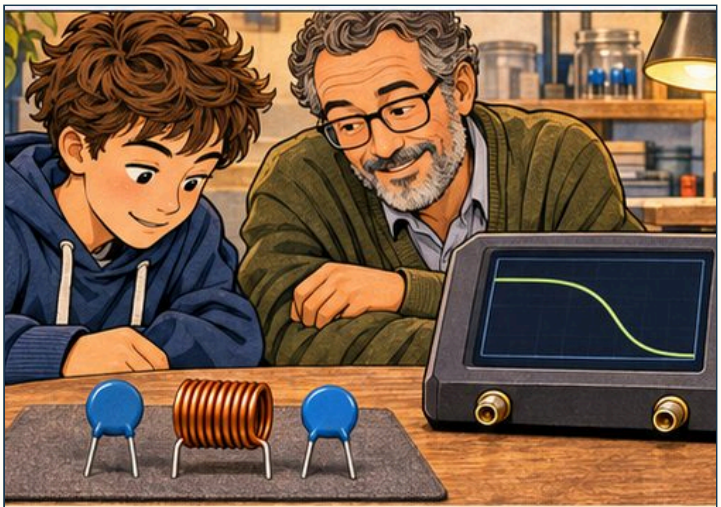
标记相同的元件也可能略有不同。



仿真可以研究多种数值组合。



它帮助预测可能的响应范围。



测量随后检验实际使用的元件。

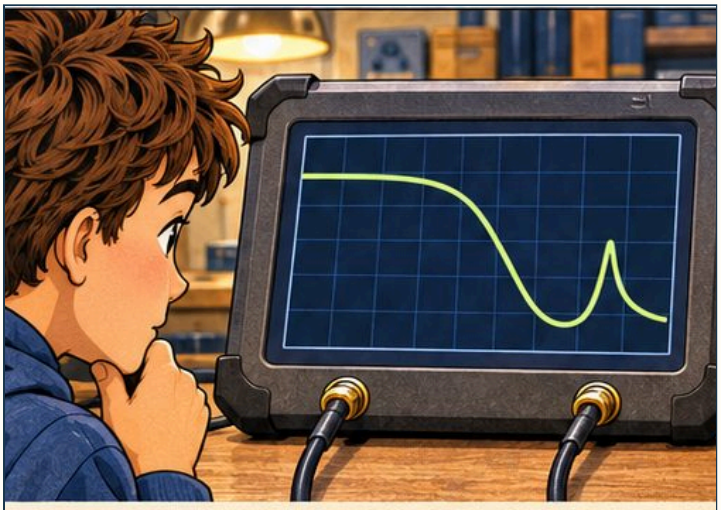
隐藏的元件



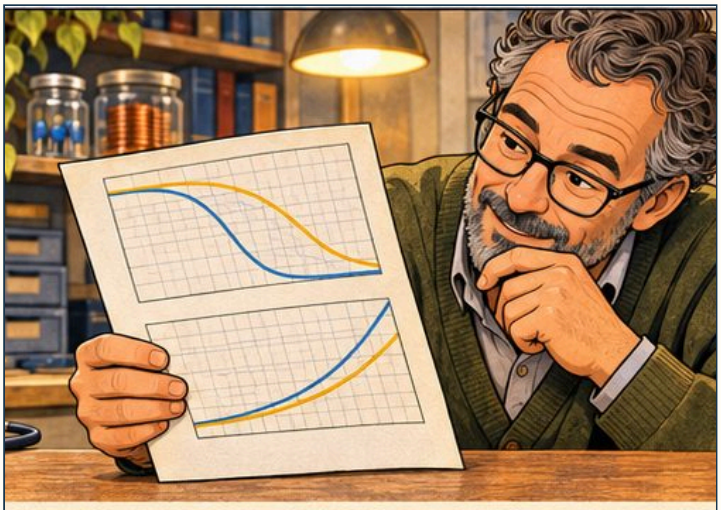
实际线圈还具有电阻和寄生电容。



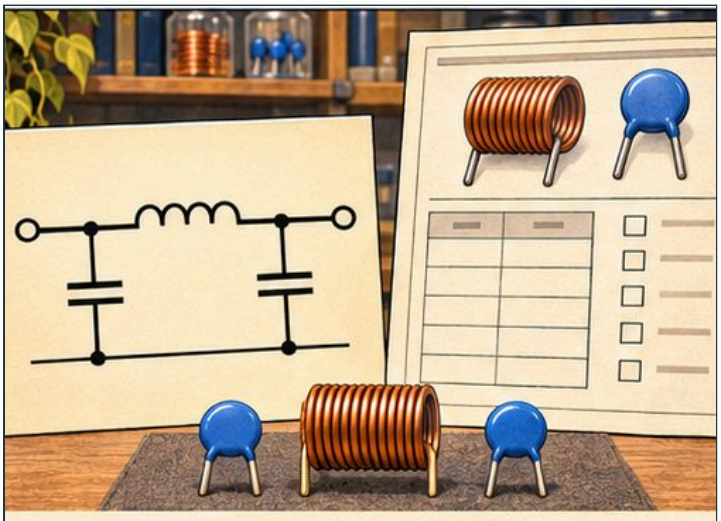
电容则存在损耗、寄生电感等效应。



接近某些谐振时，它们的特性会改变。



数据手册中列出了需要检查的限制。



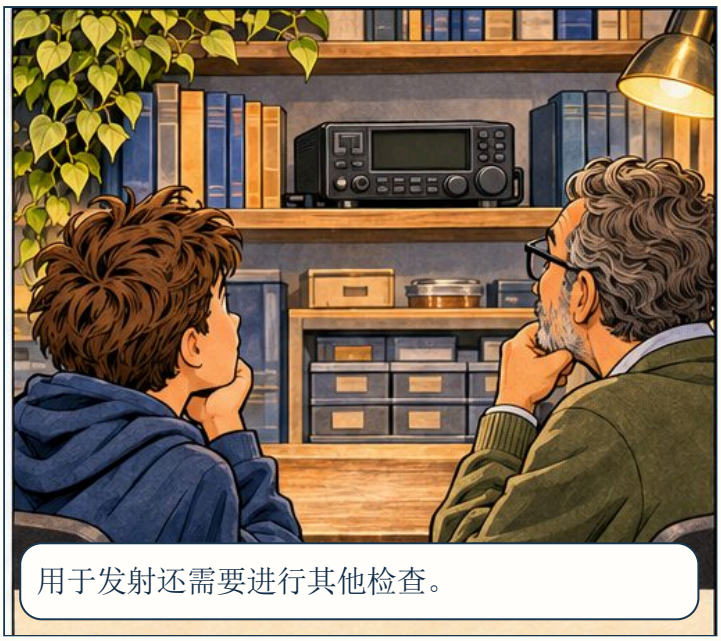
因此，只知道皮法或微亨数值并不够。



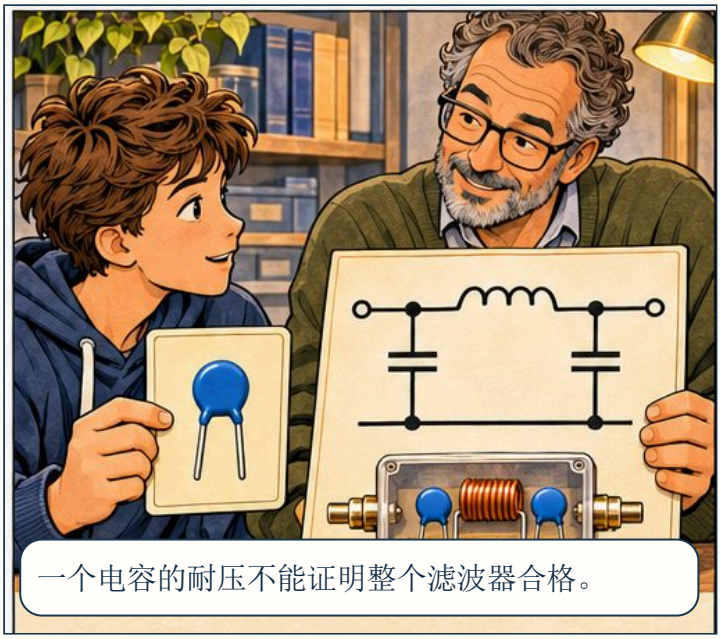
少年学会了继续阅读第一行以外的内容。

台架测试不等于发射机合格





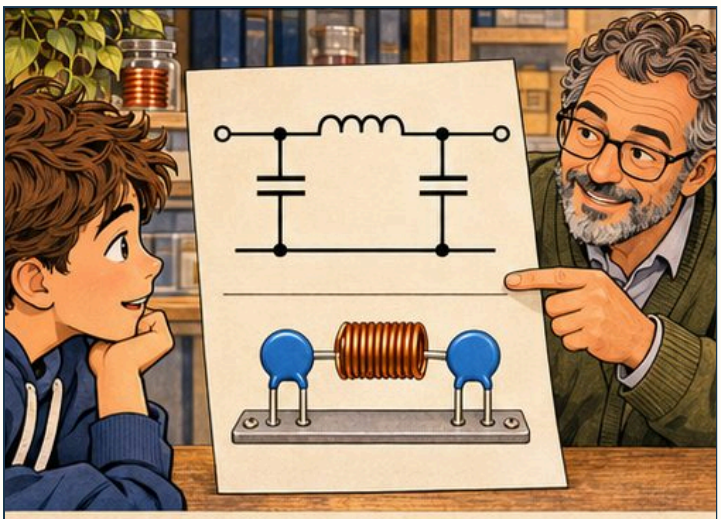








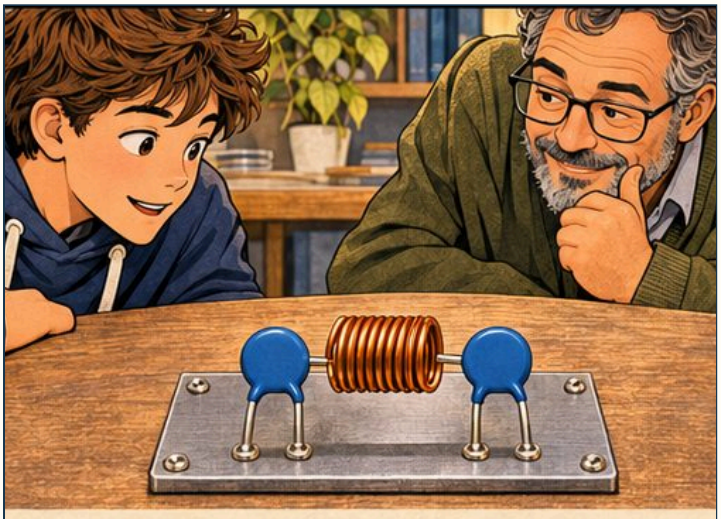
规划实物布局



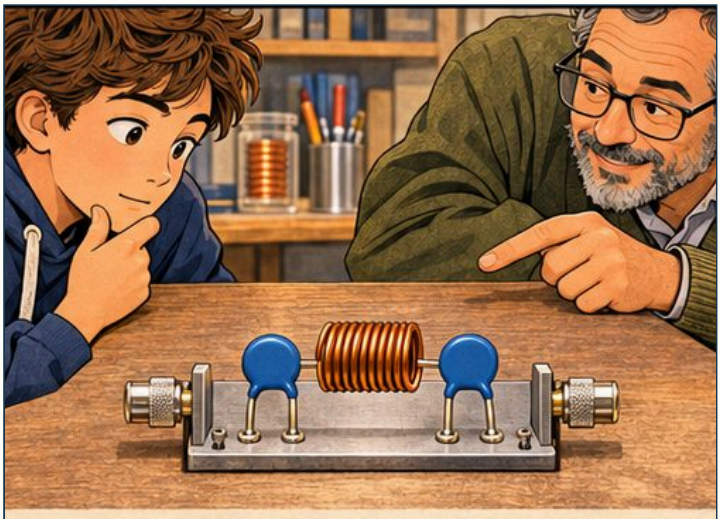
电路图标出连接，却没有描述全部几何关系。



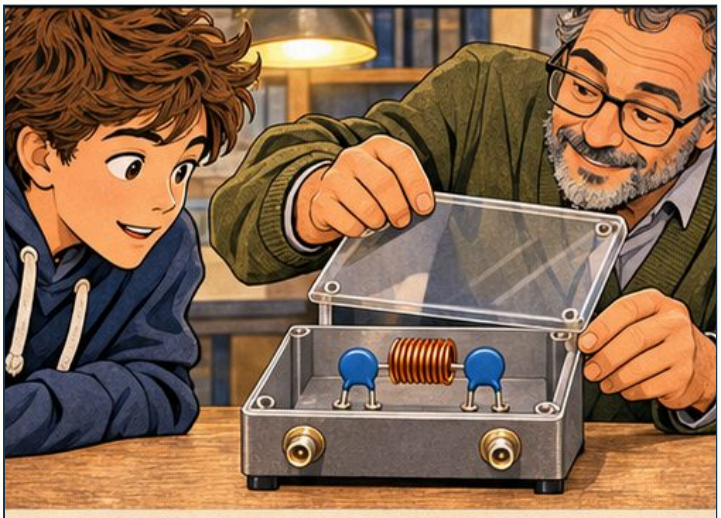
在这些频率下，连线长度和布局可能影响结果。



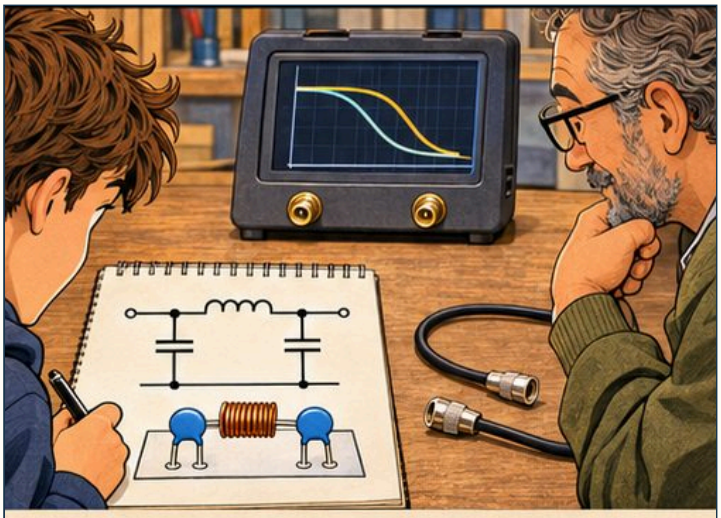
他们安排公共地和短连接。



还将可能直接耦合的路径分开。



Henri准备了适合测量的演示装置。

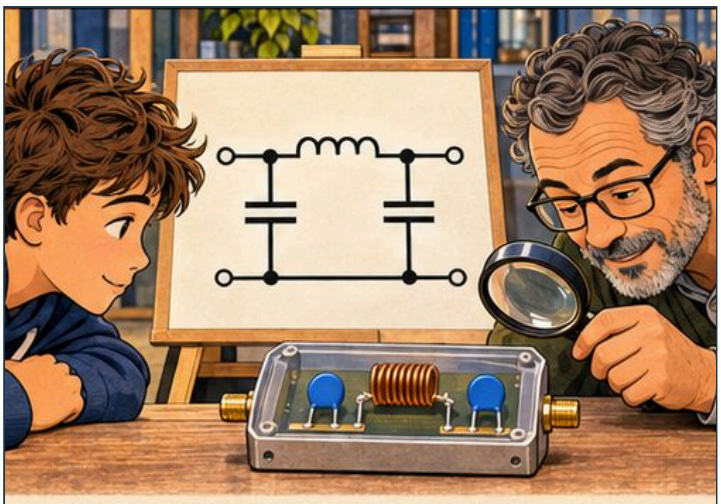


Lucas逐一把实物连接与电路图比较。

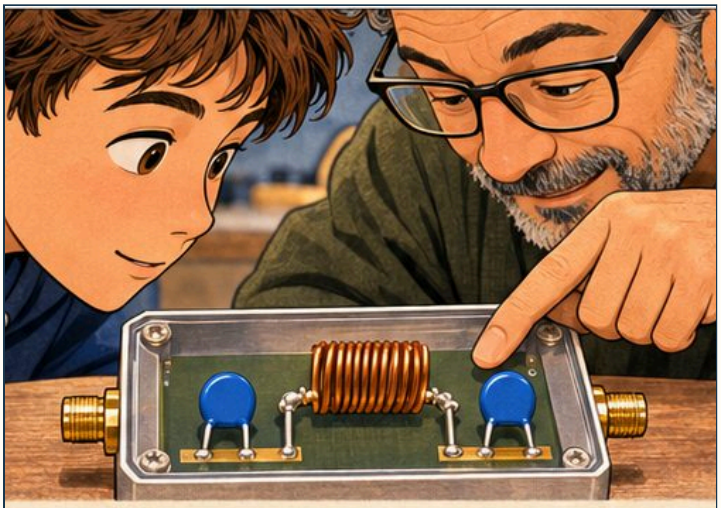
连接之前先检查



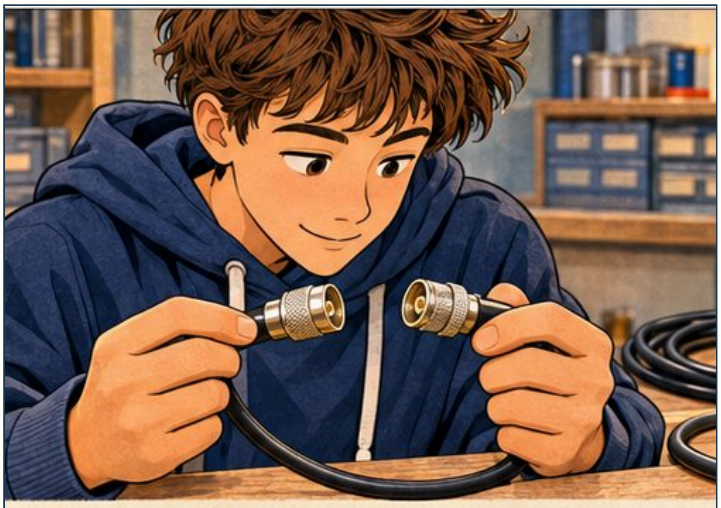
准备期间，测量信号源保持关闭。



他们检查连接、元件和公共地。



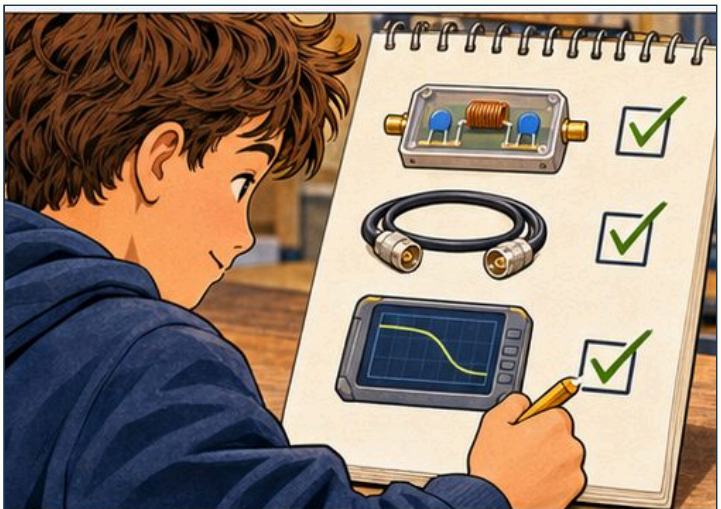
他们寻找短路、接线错误和损坏元件。



接下来检查连接器和电缆。



导师核对仪器的输入限值。

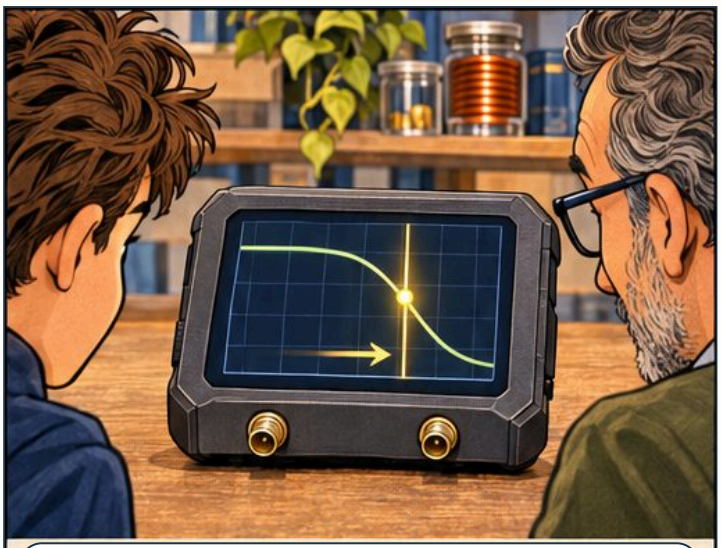


少年在第一次扫描前完成检查表。

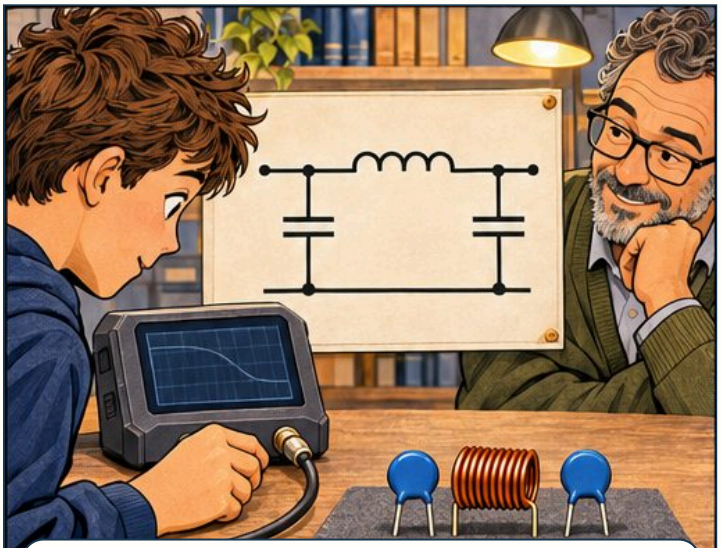
分析仪提出问题



网络分析仪发出一个已知的小信号。



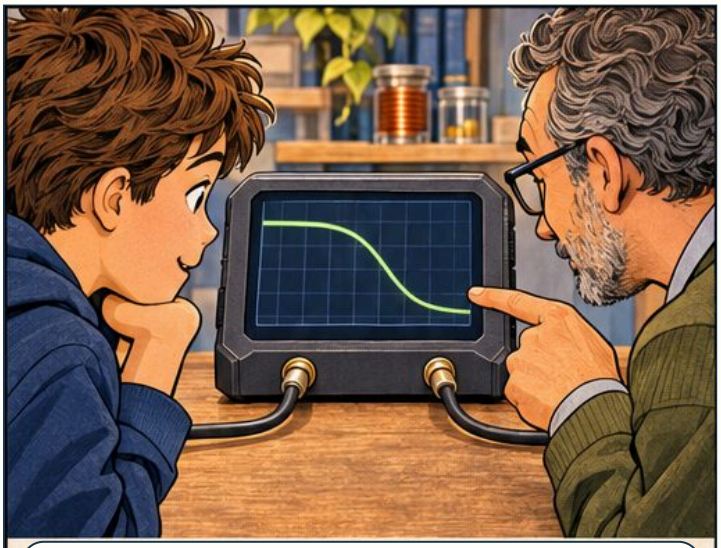
它扫描选定的频率范围。



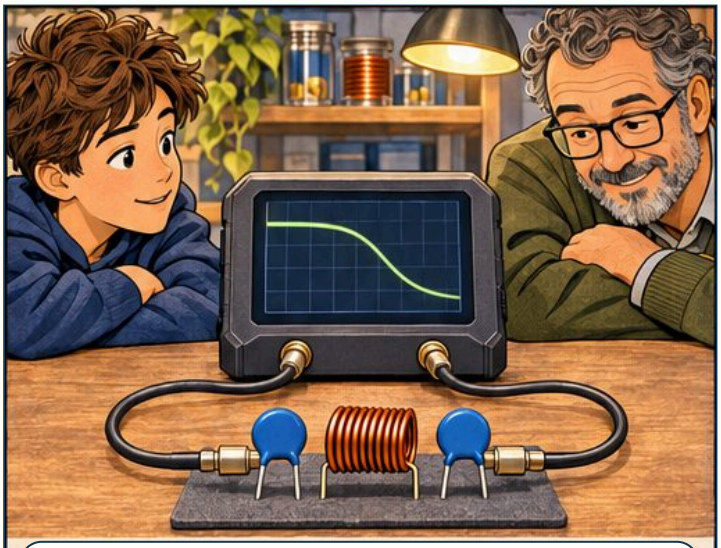
端口 1 向滤波器输入端提供信号。



端口 2 观察输出端的传输。



S21 参数可用于跟踪这项传输。



两个端口提供规定的 50 Ω 参考条件。

在正确位置校准



电缆和转接头也参与测量。



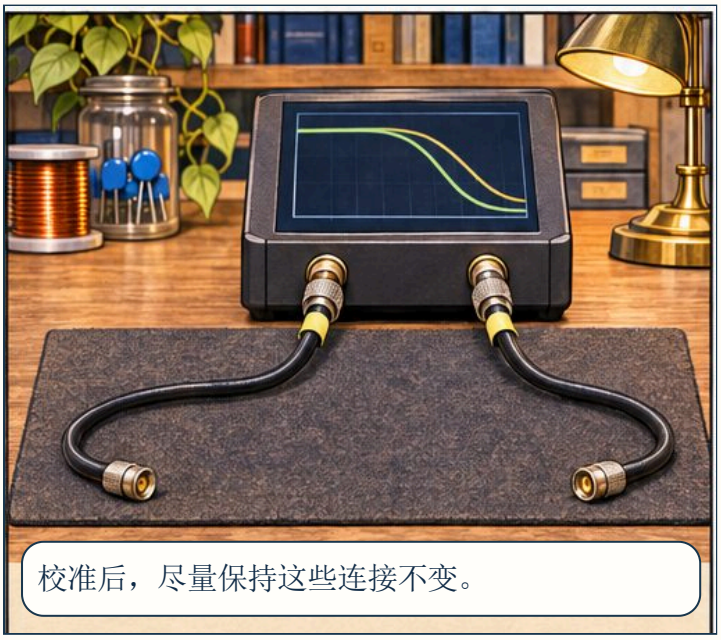
因此，他们按照仪器规定的流程进行校准。



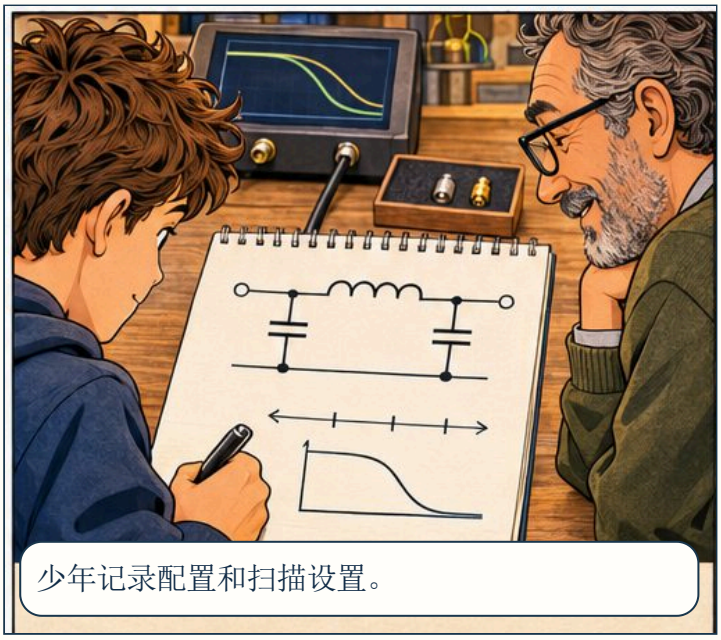
根据说明书连接适当的校准标准件。



参考面设置在电缆末端。



校准后，尽量保持这些连接不变。



少年记录配置和扫描设置。

检查直通路径



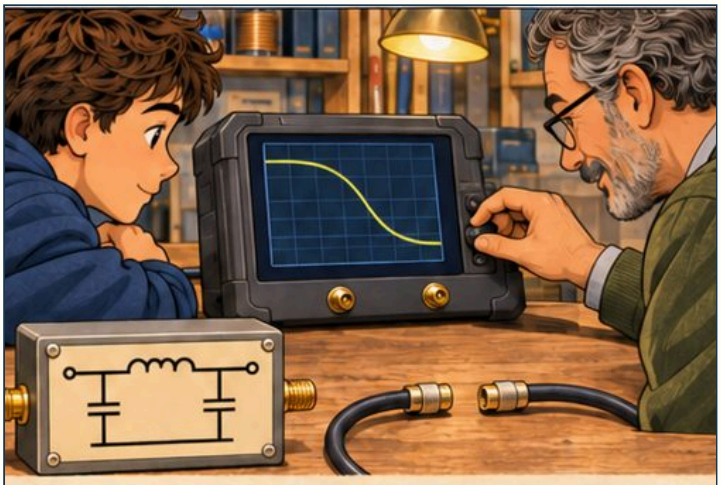
接入滤波器前，先用直通连接检查参考。



预期传输应与这条连接相符。



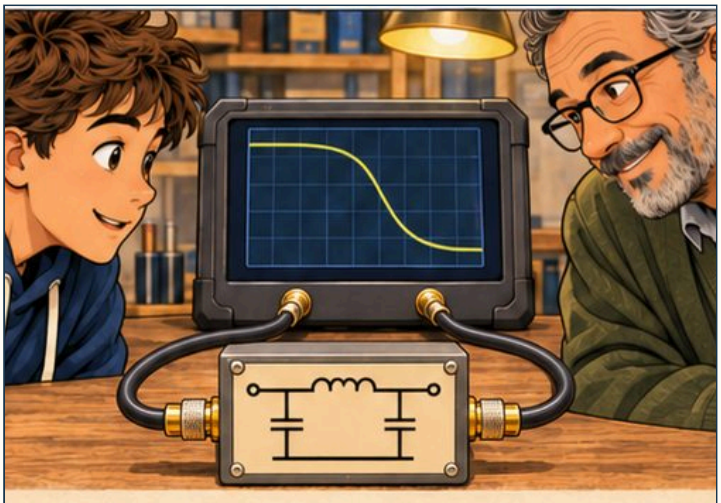
出现异常时，必须检查电缆、校准和设置。



不能修改滤波器来掩盖测量台的问题。



检查结束后，先停止信号源再连接。

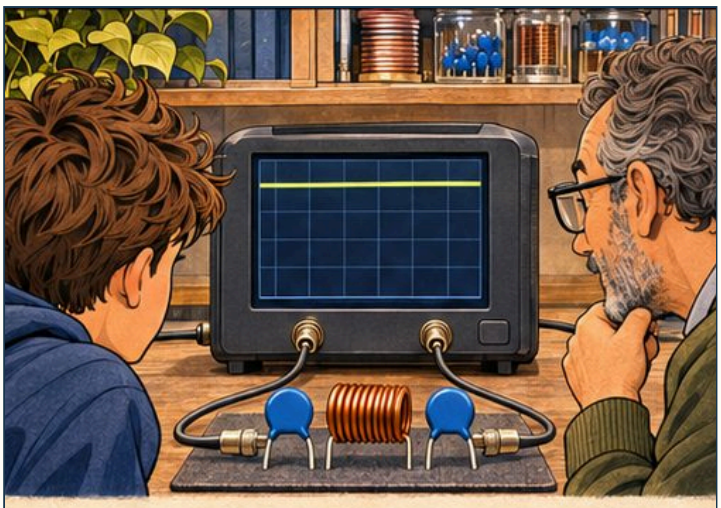


随后把滤波器放到两条电缆之间。

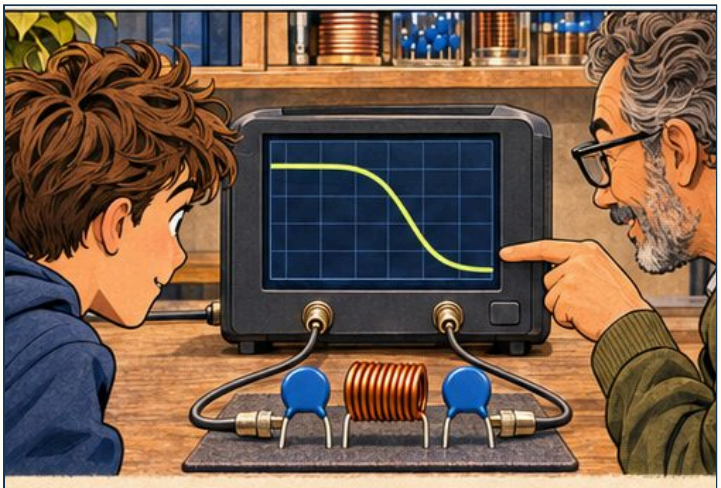
第一次扫描



他们启动扫描，覆盖有用频带和过渡区。



曲线在低频处保持较高。



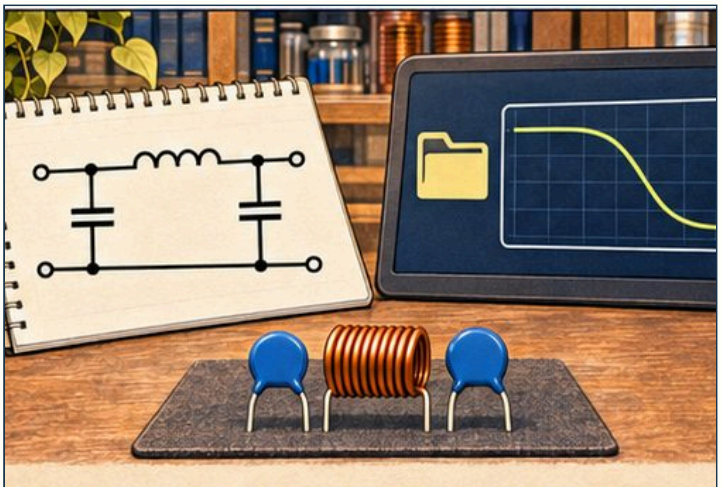
然后随频率升高逐渐下降。



少年认出了预期形状，但没有假定完全一致。

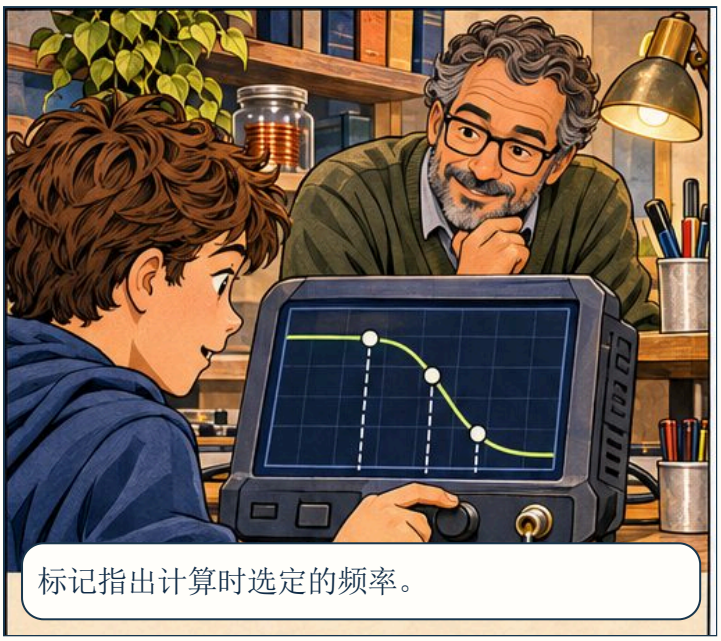


他保存曲线和测量条件。



保存的结果便于在每次修改后比较。

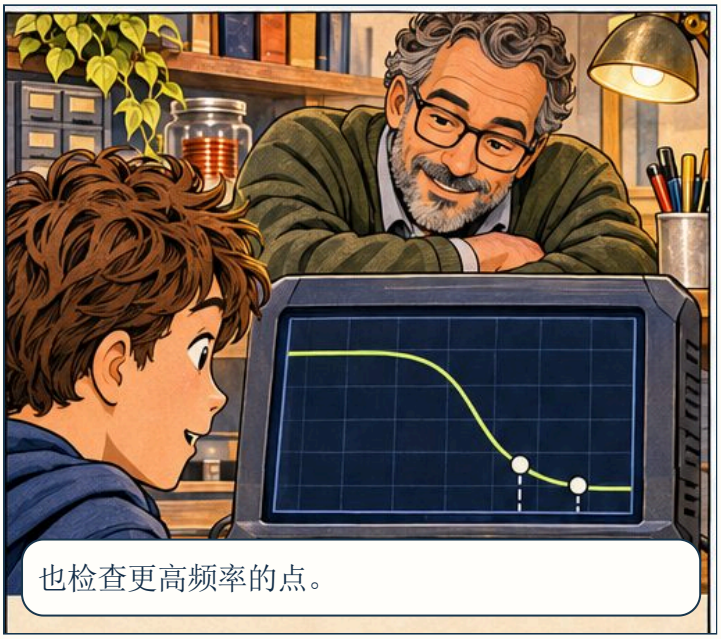
读取指定的点



标记指出计算时选定的频率。



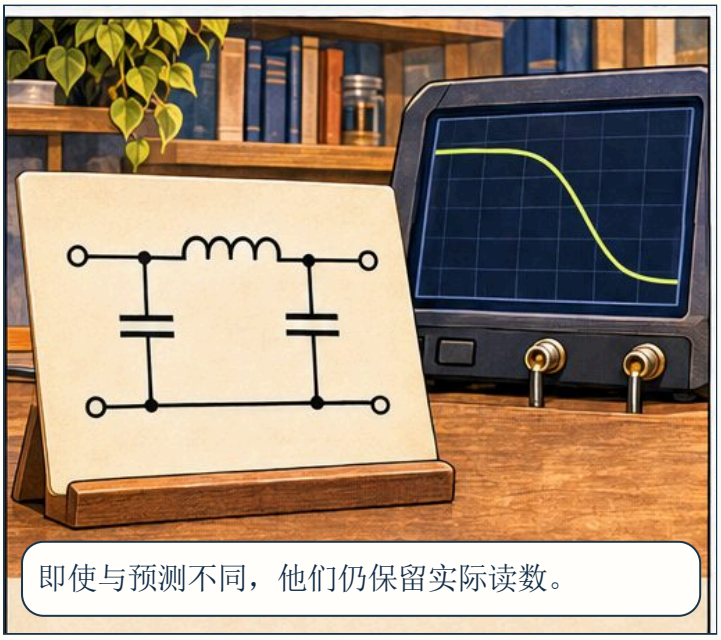
他们读取预期截止频率附近的传输。



也检查更高频率的点。



实际读数填入测量栏。



即使与预测不同，他们仍保留实际读数。



少年还注明日期和配置。

理解偏差


观察到的截止频率可能与计算值不同。


选用数值及其容差提供了最初的线索。

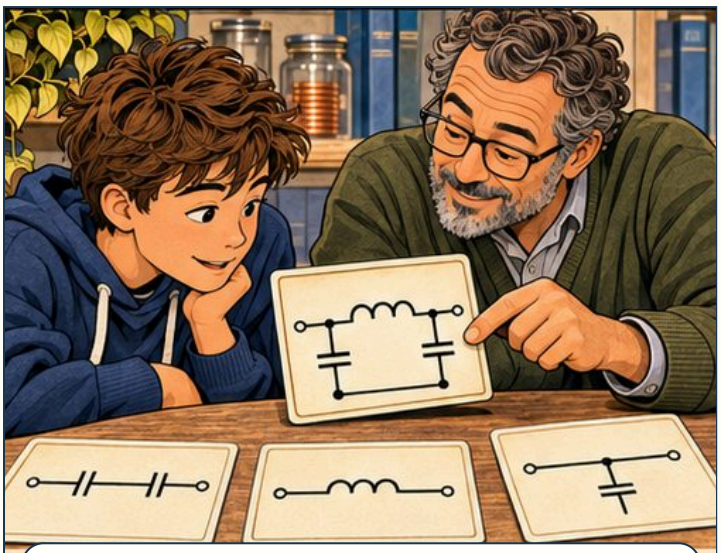

损耗、布局和校准也值得检查。


他们先验证这些猜想，再判断公式是否有问题。

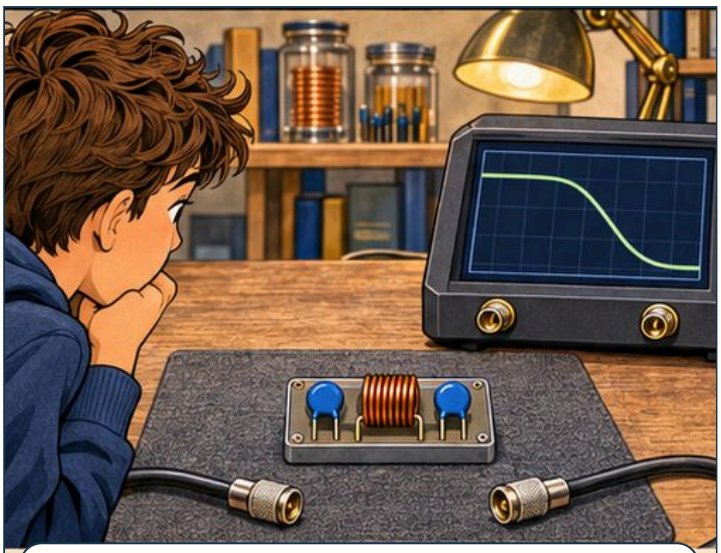

一条不同的曲线本身并不能说明原因。


少年把惊讶转化为新的问题。

一次只改一处



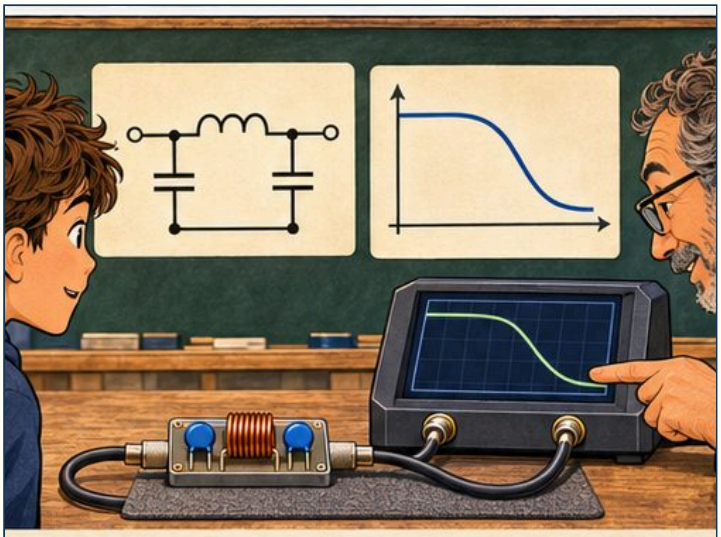
他们选择一个假设，准备有依据的修改。



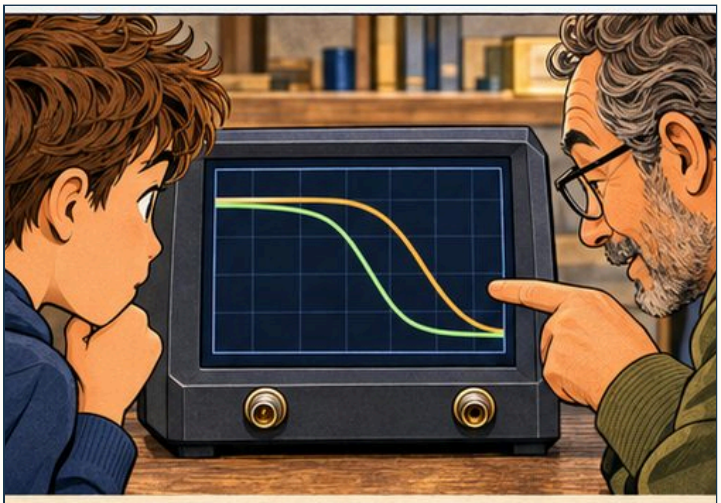
操作前，停止信号源并断开模块。



Henri完成修改，再检查电路。



扫描在相同且有记录的条件下重新进行。

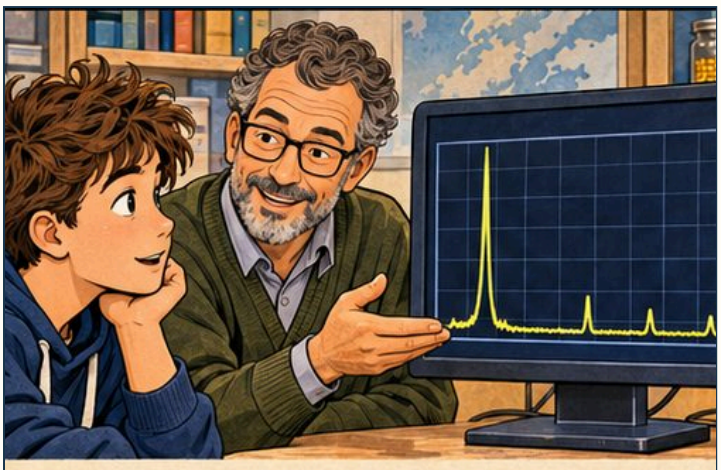


他们比较旧曲线与新曲线。

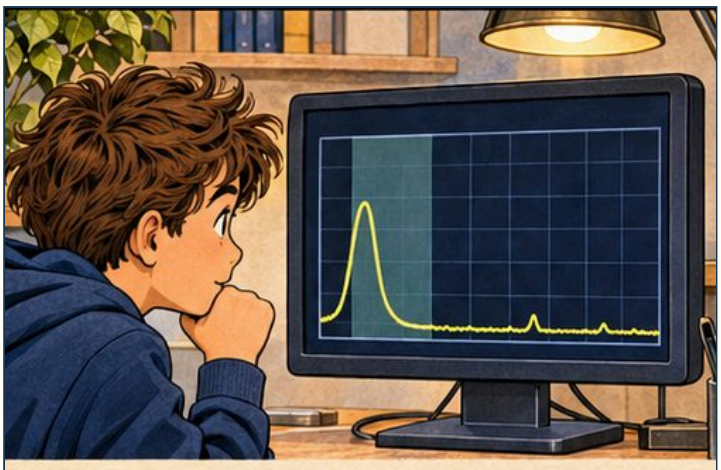


这种方法避免混淆多个可能的原因。

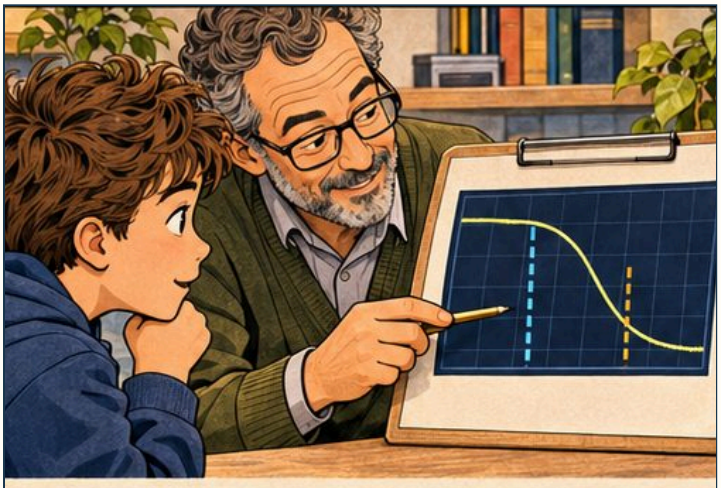
衰减也有限制



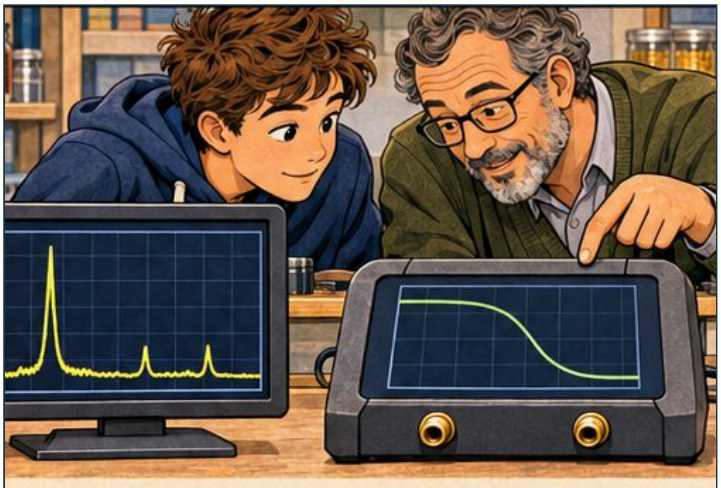
低通滤波器不会消除所有不需要的分量。



位于通带内的分量只会受到较小衰减。



抑制能力取决于频率和实际实现。



完整的频谱检查还需要适当的补充测量。

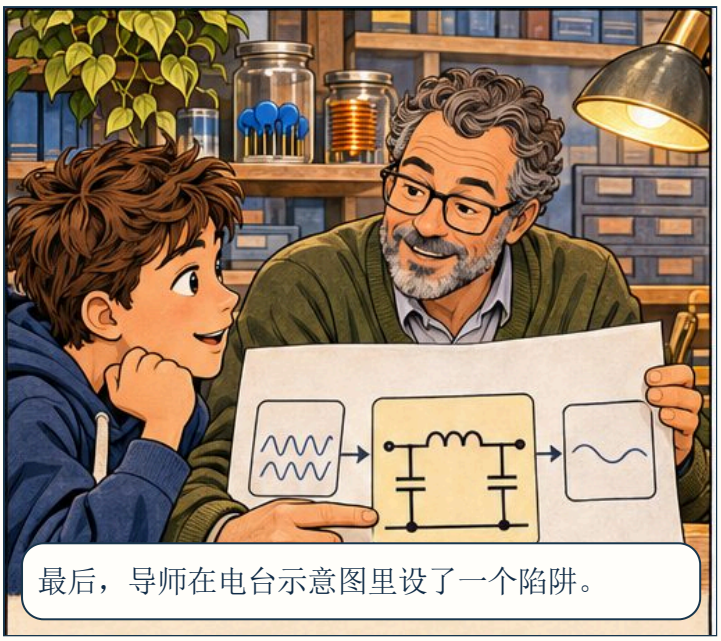


装有滤波器并不能证明电台符合规定。

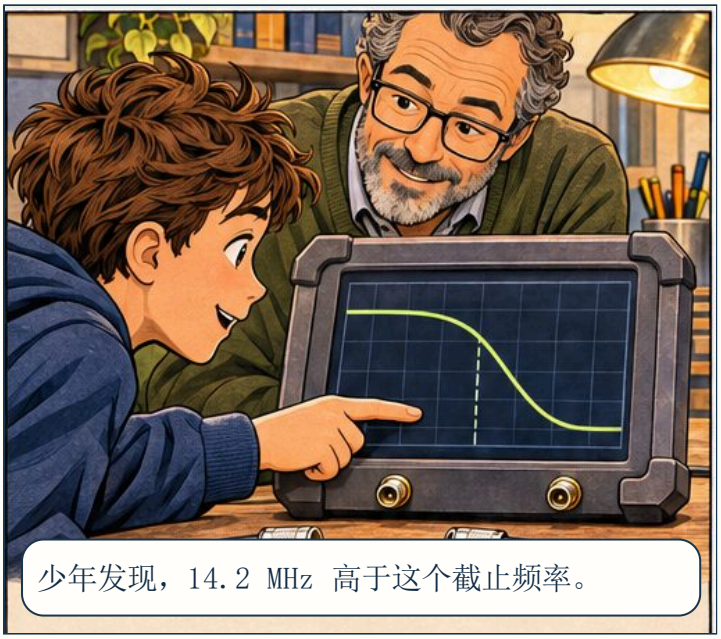


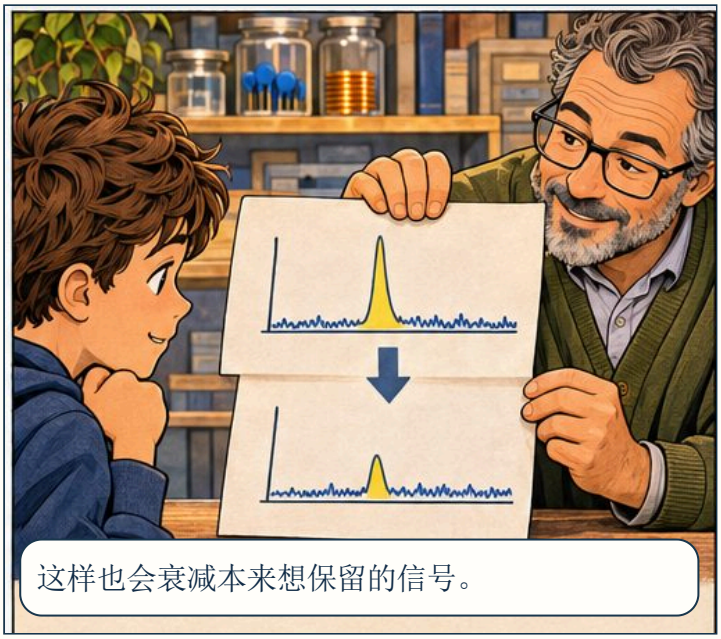
少年分清了有用功能和全面保证。

有用的频率必须通过

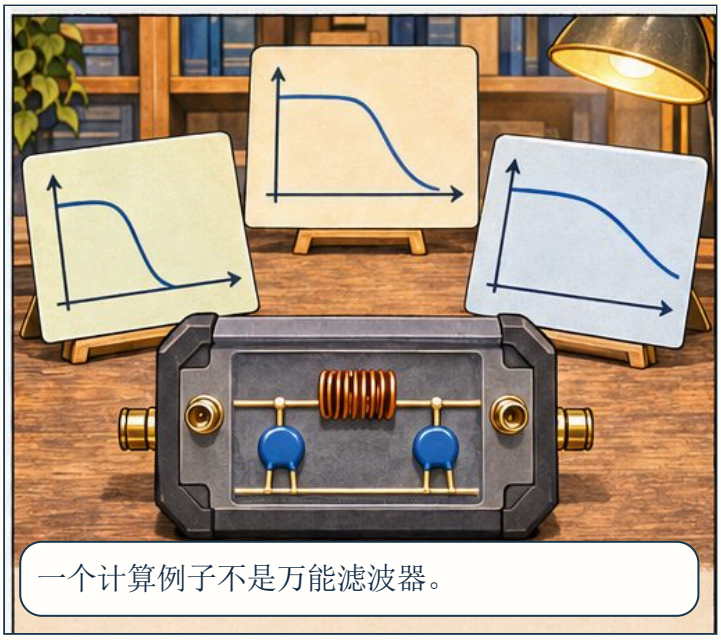

最后，导师在电台示意图里设了一个陷阱。


图中把 14.2 MHz 与他们的 10 MHz 截止频率配在一起。


少年发现，14.2 MHz 高于这个截止频率。

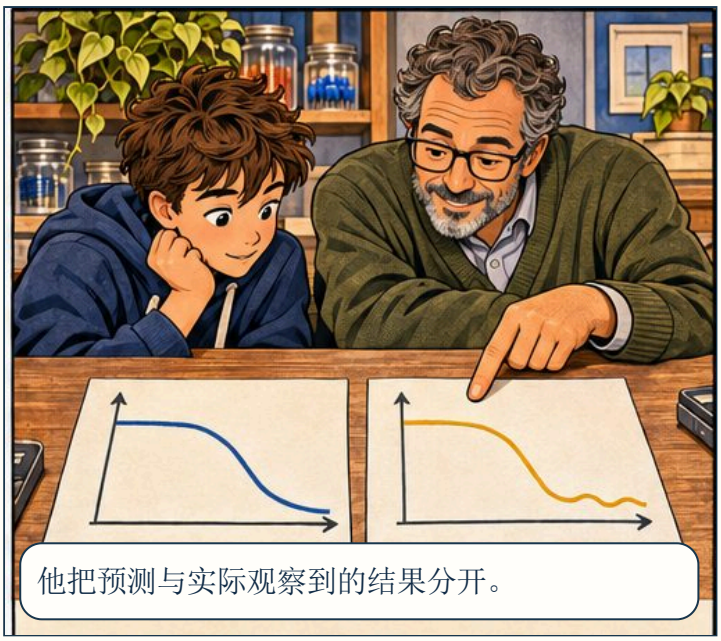

这样也会衰减本来想保留的信号。

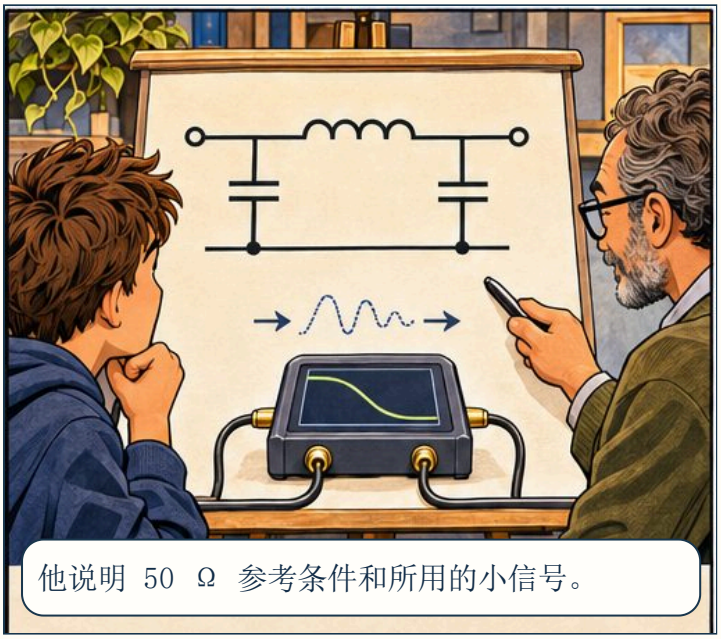

使用之前，必须重新检查设计要求。


一个计算例子不是万能滤波器。

准备分享自己的解释

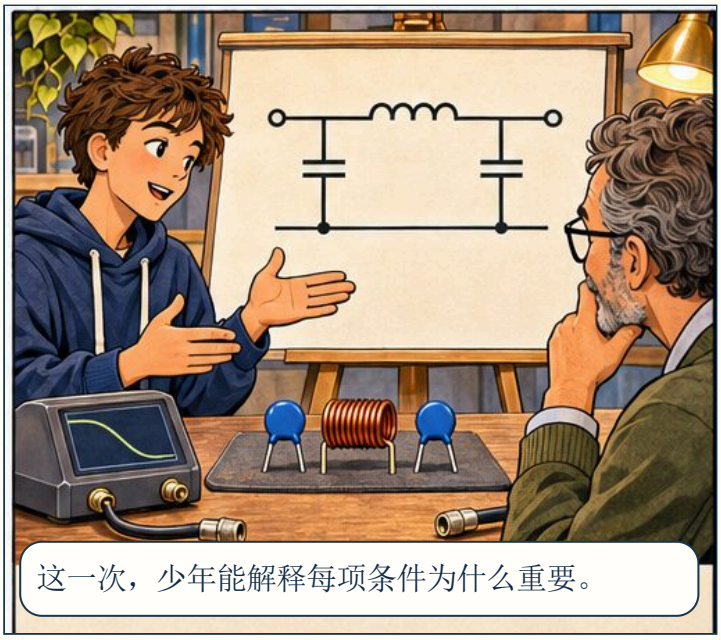

Lucas整理需求、电路图、计算和元件选择。


他把预测与实际观察到的结果分开。


他说明 50 Ω 参考条件和所用的小信号。


他保存曲线、校准情况和实验限制。


Henri扮演访客，提出最后一个问题。


这一次，少年能解释每项条件为什么重要。

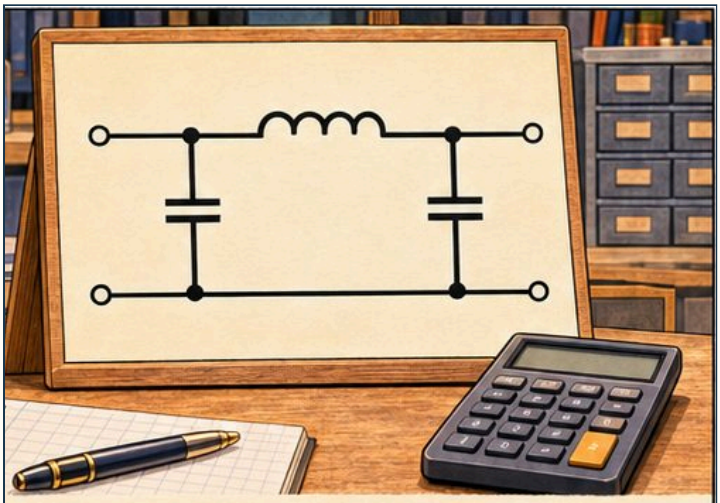
理解、计算、测量



三个元件回到了教学盒里。



少年现在能把需求与滤波器响应联系起来。



他能计算这个 π 型巴特沃思，并检查单位。



他也会测量、比较和研究偏差。



笔记本保存了一套方法，以及它的假设和限制。



在俱乐部，下一次发现已经从一个问题开始。