

俞锦元 应正铭 李志平 编著

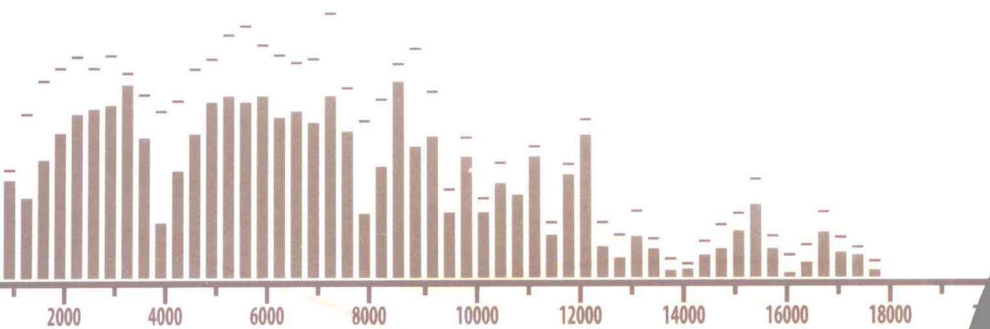
# 扬声器



YANGSHENGO  
SHEJI YU ZHIZUO

# 设计与制作

(全新版1)



广东科技出版社

广东科技出版社

全国优秀出版社

# 扬声器设计与制作

(全新版1)

俞锦元 应正铭 李志平 编著



广东省出版集团

广东科技出版社

· 广州 ·

## 图书在版编目 ( CIP ) 数据

扬声器设计与制作: 全新版1/俞锦元, 应正铭, 李志平编著. —广州: 广东科技出版社, 2012. 4

ISBN 978-7-5359-5643-9

I. ①扬… II. ①俞…②应…③李… III. ①扬声器—设计②扬声器—制作 IV. ①TN643

中国版本图书馆CIP数据核字 (2011) 第247984号

---

责任编辑: 熊晓慧

封面设计: 柳国雄

责任校对: 梁小帆

责任印制: 罗华之

出版发行: 广东科技出版社

(广州市环市东路水荫路11号 邮政编码: 510075)

E-mail: gdkjzbb@21cn.com

http: //www.gdstp.com.cn

经 销: 广东新华发行集团股份有限公司

排 版: 广东科电有限公司

印 刷: 广东新华印刷有限公司

(广东省佛山市南海区盐步河东中心路23号 邮政编码: 528247)

规 格: 787 mm × 1 092 mm 1/16 印张12.25 字数240千

版 次: 2012年4月第1版

2012年4月第1次印刷

定 价: 29.00元

---

如发现因印装质量问题影响阅读, 请与承印厂联系调换。

# 序1

俞锦元总工程师2007年编著的《扬声器设计与制作》出版后，深受电声行业技术人员及音响发烧友的喜爱，不少公司把该书列为大、中专毕业生及新入行员工的必读教材，即使是已有多年电声行业技术管理经验的人士，读该书后也深感获益匪浅。几年来不断有人向我询问在哪里可以买到这本书。

今年国光电器股份有限公司成立60周年，国光走到今天依然充满生机，得益于有一批像俞总工程师那样几十年如一日的敬业、认真学习、不断总结和永远追求进步的工程师、管理者和技工，正是他们的努力探索，提升了公司的电声和音响技术水平，并和全国的电声工作者一道，努力把中国建成了世界的电声大国且正向电声强国迈进。

《扬声器设计与制作（全新版1）》的出版，相信同样会受读者的欢迎，也希望行业的专家们能有更多的新作推出，促进电声和音响技术的进步。

国光电器股份有限公司

董事长：周海昌

2011年6月

## 序2

俞总工程师一直专注于扬声器及其音箱系统的技术研究和制作，在不断吸收国外先进技术的同时，经过不断的摸索、试验、论证，总结出许多更具有实用价值的经验。此是专业人士和广大音响业余爱好者不可多得的、提升专业水平的参考书。

国光电器股份有限公司

总经理：何伟成

2011年6月

# 前 言

自2007年本人编著的《扬声器设计与制作》出版以来，承蒙我国扬声器业界的不少同仁及音箱发烧友读后的良好反馈，鼓励笔者继续撰写有关扬声器的实用技术书籍。这里首先要感谢国光电器股份有限公司领导周海昌董事长和何伟成总经理给了笔者一个这样的机遇——在完成指定的工作之余可进行扬声器资料翻译、写作并做一些必要试验的平台，使本书可在两年内问世。

本书第1章、第2章内容编译自俄罗斯С·巴契先生2008年出版的 ЛЮБИТЕЛЬСКИЕ ГРОМКОГОВОРИТЕЛИ 3 (《业余扬声器3》)一书中的第2章、第3章。多年来，巴契先生撰写了大量的扬声器设计的文章，由于其实用性强，深得扬声器设计者和发烧友青睐。笔者曾在《扬声器设计与制作》一书第10章第108页上介绍巴契先生关于扬声器设计的内容。本书介绍的是结合现代计算机软件的分频器设计，各种滤波器、校正回路、补偿回路、相位校正电路特性和应用。值得重视的是，书中提到：在三分频音箱中由于分频点的选择问题会出现容性负载，使低频响应曲线上出现影响听觉的峰值，同时较详细地介绍了解决容性负载的方法。这是音箱设计值得一读的精华。这种结合实际的描述在众多音箱设计类书籍中是少见的。第2章还引入了欧洲扬声器厂家对扬声器T/S参数的补充：加速度系数与音质的关系。这也是值得我国读者借鉴的。第3章对双扬声器对扣等声学结构进行了讨论，其性能分析也颇具实用意义的。第4章至第6章取自本人近年来在电声技术杂志上发表且认为有生命力的文章，经修改并增补了最新的内容，如对纸盆中细小短纤维的再认识等。本书第7章由广州国光电器股份有限公司李志平工程师撰写。这章内容是其对扬声器用胶黏剂的真知灼见，相信会得到读者的喜爱。第8章由台湾弘凌企业有限公司、香港海帆国际有限公司和东莞弘凌电子有限公司的磁液专家应正铭先生撰写。应先生在文内介绍了磁液的结构、工作原理及其在扬声器中应用时的要点等，叙述详细，内容深入浅出，相信会得到读者青睐。第8章的完成还要感谢香港海帆公司罗权得总经理和日本Ferrotec磁液事业部总经理广田泰丈先生的支持。

感谢广州国光电器股份有限公司苏伟帆先生为本书插图做了大量的工作，感谢俞炽明先生、曾丽勤女士为整理书稿付出的努力。

感谢我的家人、师长、朋友和同事长期以来给予本人的关怀和帮助。特别是学友杨稽羚、叶超群、应健美等多年来对本人工作、学习的支持。还要衷心感谢广州市第二人民医院关国晟主任医师对本人健康的关怀。

限于水平，本书不足之处在所难免，希望读者不吝指正。

俞锦元

2011年6月于广州花都

# 目 录

<b>第1章 扬声器系统中的分频器设计</b> .....	1
1.1 术语和概念 .....	1
1.2 相位关系 .....	2
1.3 延迟 .....	4
1.4 滤波器 .....	5
1.5 校正回路和补偿回路 .....	13
1.6 相位校正电路 .....	16
1.7 分频器的制作 .....	19
<b>第2章 扬声器系统中分频器的设计举例</b> .....	21
2.1 采用AUDAX HM170 Z18和MOREL MDT30电动式扬声器单元的两分频扬声器系统 .....	21
2.2 低频滤波器和低音单元的相互作用 .....	30
2.3 采用SEAS H1288、H1262、H1149电动式扬声器单元制作三分频扬声器系统 .....	37
2.4 与分频器结合的模块化扬声器系统 .....	50
附图 .....	64
参考文献 .....	66
<b>第3章 用双电动式扬声器单元的声系统制作</b> .....	67
3.1 概述 .....	67
3.2 双电动式扬声器单元的结构与特性 .....	67
参考文献 .....	73
<b>第4章 箱体边缘的声衍射</b> .....	75
4.1 测试设备配置 .....	75
4.2 测量 .....	76
4.3 减轻边缘影响 .....	79
4.4 倾斜箱的检测 .....	84
4.5 结论 .....	89
参考文献 .....	90
<b>第5章 扬声器新动态综述</b> .....	91
5.1 现代扬声器工程材料动态 .....	91
5.2 锥盆和球顶膜用的通用金属 .....	91
5.3 通用陶瓷 .....	92
5.4 锥盆和球顶膜用的轻金属合金 .....	93



5.5	锥盆和球顶膜用的工程纤维 .....	94
5.6	无磁芯、无夹板磁路简析 .....	97
5.7	锥盆不产生分割振动的扬声器 .....	99
5.8	小巧的Dayton Audio WT3低音扬声器测试仪 .....	102
5.9	扬声器的橡胶折环 .....	108
5.10	常用的橡胶折环 .....	109
5.11	压电扬声器材料进展 .....	111
5.12	对纸盆中细小短纤维的再认识 .....	112
	参考文献 .....	114
<b>第6章</b>	<b>电容器与音质 .....</b>	<b>115</b>
6.1	音频电容器对声质量的影响 .....	115
6.2	在声系统分频器中电容器的比较 .....	118
	参考文献 .....	132
<b>第7章</b>	<b>扬声器胶黏剂应用综述 .....</b>	<b>133</b>
7.1	概述 .....	133
7.2	胶黏剂的一些特性 .....	134
7.3	胶黏剂在扬声器中的作用 .....	139
	参考文献 .....	144
<b>第8章</b>	<b>磁液在电动式扬声器中的应用 .....</b>	<b>145</b>
8.1	Ferrotec公司与磁液 .....	145
8.2	磁液的主要成分 .....	145
8.3	磁液与磁性 .....	147
8.4	磁液的用途 .....	148
8.5	磁液的主要物理特性 .....	148
8.6	磁液在高温下及强磁场中的寿命 .....	150
8.7	磁液的胶体稳定性与“定居”现象 .....	152
8.8	音响级磁液的功效 .....	156
8.9	音响级磁液新品种介绍 .....	163
8.10	各种扬声器与特定磁液品种的一般指引 .....	166
8.11	磁液用量的计算和控制 .....	169
8.12	磁液和其他材料的相容性以及扬声器的可靠性 .....	173
8.13	如何选用恰当的磁液品种 .....	176
8.14	磁液对频响曲线的影响和对策 .....	180
8.15	低音扬声器和超低音扬声器防止磁液飞溅的主要手段——通风孔 .....	180
8.16	磁液的储存条件和保质期 .....	183
	参考文献 .....	184

# 第1章 扬声器系统中的分频器设计

## 1.1 术语和概念

这里引入的某些术语和概念的定义对我们开展设计工作是有帮助的。

分频器（英文：crossover，俄文：кроссовер）在扬声器系统中，分频器可在电动式扬声器单元之间完成分配声音的频谱及根据声压级匹配各个电动式扬声器单元的功能。

为了实现上述的功能，在分频器中要采用滤波器，校正和匹配结构。

电动式扬声器单元的共同辐射区域 这是频率间隔，在这个频率范围内扬声器系统的幅频特性（振幅频率响应特性）是由两只电动式扬声器单元辐射的声压形成的〔扬声器（系统）一词可理解为音箱，这已是国内外惯例，下同〕。

分频频率 位于共同辐射的中心区域，并可作为计算滤波器的某个支持值。在理想的情况下，电动式扬声器单元的幅频响应是保证相等的声压值条件下在分频频率处相交的。在实际的扬声器系统中，通常由于幅频响应曲线的波动性使相交点与分频频率差别不大。图1-1示出了分频频率为1 500 Hz的两分频扬声器系统的共同辐射区域。

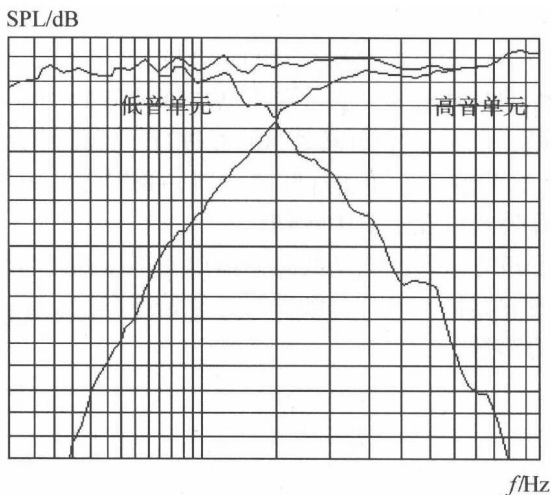


图1-1 共同辐射区域

位于共同辐射区域内的任何频率处，扬声器系统的幅频特性都是由两个扬声器单元（或几个）幅频特性复合的结果。由此出发，制作分频器的任务就在于形成这种声压的幅频特性的滑落，则幅频特性复合时即可获得总的给定形状。因此对于分频器的设计来说，需要知道，求和的幅频特性是怎样的，以及怎样获得给定形状的幅频特性滑落。

在处理扬声器系统时电信号和声信号在许多方面是很相似的。然而，它们不同的物理性质决定了传播速度的根本差异。在电回路中，信号是以光速传播的；而在空间中，声信号是以声速传播的。在速度方面有 $10^6$ 差异导致了分频器电路内电信号传播的延迟不会影响信号的相位关系，而对电动式扬声器单元间空间辐射的相位关系，传播的延迟则会起着重要的作用。考虑传播延迟的重要性，在此将引用“电动式扬声器单元声中心”的概念。

**电动式扬声器单元声中心** 这是一个被称为辐射延迟等于零的点。声中心可作为计算电动式扬声器单元至测量传声器或至听音点的信号延迟过程的参考点（图1-2）。

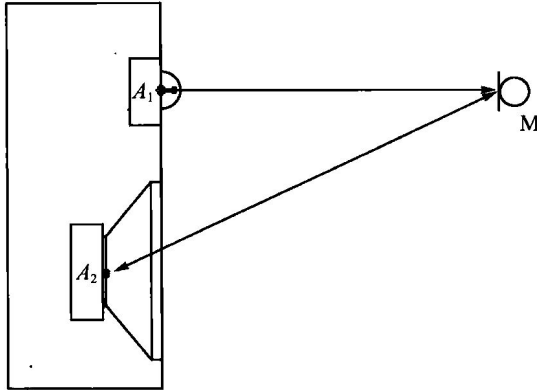


图1-2 电动式扬声器单元声中心的传播延迟计算

可以近似认为，声中心就是纸盆和音圈的结合处。

为了形成幅频特性的某种滑落，必须要了解电滤波器的特性。许多滤波器的称呼是与专家的姓名相联系的，因为这些专家对滤波器进行了详细的数学分析。例如，Bessel（Бессель，贝塞尔）滤波器。为简述这些滤波器，我们将使用规范的国际通用称呼。这些规范滤波器的计算公式可在手册中找到。

分频器的设计和分析方法基于电动式扬声器单元声压幅频特性的模拟和电滤波器的传输特性上。在利用滤波器特性设计分频器时必须始终牢记，不是电信号发生复合，而是电动式扬声器单元的辐射。

## 1.2 相位关系

电动式扬声器单元的辐射（像交流电压）要考虑相位像矢量那样的叠加（图1-3）。因此，在设计分频器时必须考虑在求和点上影响辐射相位的3个基本要素：

①电动式扬声器单元的相频特性；②信号的传播延迟；③滤波器的相频特性和分频器的其他环节。

幅频特性和相频特性彼此是有联系的。Гильберта. Боде 变换（Hilbert. Bode transform）可以根据已知的幅频特性计算出相频特性。

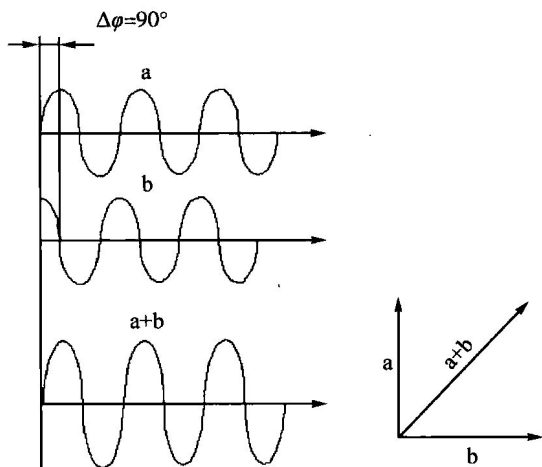


图1-3 电动式扬声器单元辐射矢量的叠加

然而，这样算出的相频特性既没包含与电动式扬声器单元位置有关的信息，也没有有关电信号和声信号之间的相位移信息。在个人电脑基础上的测量系统提供的软件可借助于这种变换计算出相频特性。在相应的软件菜单中，这种操作通常被称为最小相位变换。图1-4示出了利用美国LMS扬声器测试系统提供的软件，根据幅频特性计算出的最小相位的相频特性。

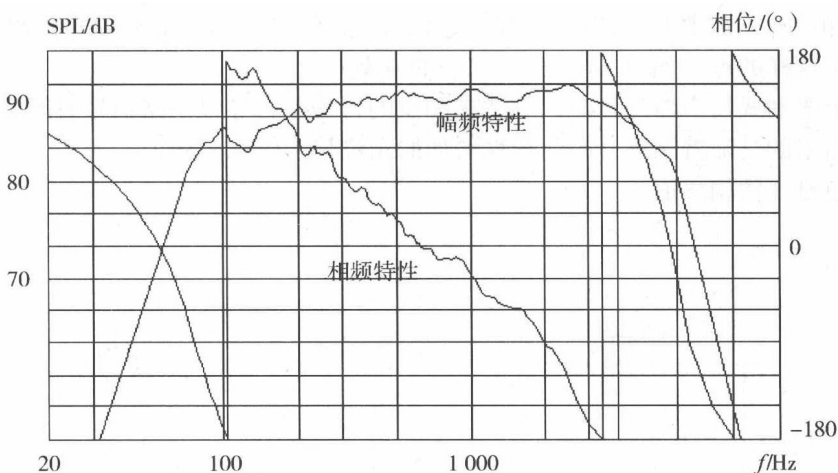


图1-4 测量出的幅频特性和计算得到的相频特性

图1-5示出了相对电信号的电动式扬声器单元辐射相位关系曲线。在电动式扬声器辐射共振频率 $f_s$ 处，声信号相对于音圈引线端上的电信号相位上延迟 $90^\circ$ 。随着频率增加，相位延迟增大并趋向于 $180^\circ$ 。因为要处理的是相位延迟，所以在相位图上用负号表示。相频特性的斜率是与电动式扬声器单元的品质因数有关的。随着品质因数增大，相频特性的斜率也增大。在高于 $2f_s$ 的区间频率处相位变化变弱，此处称为相位滑落区域。在设计分频器的时候，如果所有的扬声器单元都工作在相位滑落的频率区域，那么相对于电信号的辐射相位延迟是可以不考虑的。如果电动式扬声器单元的共振频率位于

共同辐射区域，电信号和声信号之间的相位移影响就会变得很重要。

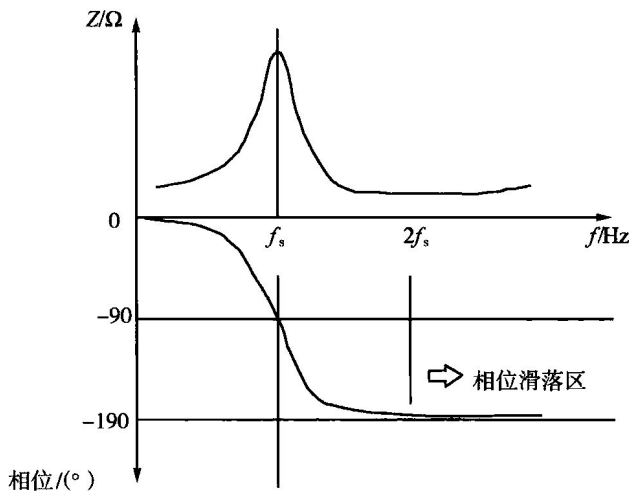


图1-5 电动式扬声器单元的相频特性

### 1.3 延迟

在大多数情况下，电动式扬声器单元的声中心处于距求和点不同的距离上，在声中心位置上测试时，放置测量传声器或听音者头部在该位置上，如图1-6中点 $M_1$ 。也有行程差等于零这样的点，如图1-6上 $D_1^* \approx D_2^*$ 的 $M_2$ 处。

在两个电动式扬声器工作时，到达求和点的行程差会导致一路信号时间延迟。信号延迟表现出来的是随着频率升高而线性增加的相位移（简称相移）。

下面定量评估相移值。

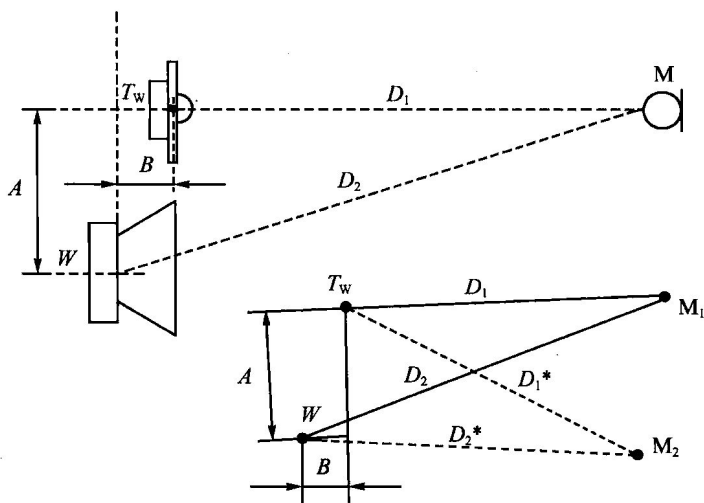


图1-6 大多数情况下电动式扬声器单元间的声中心距测量传声器不同的位置上

假设图1-6所示的扬声器单元间分频频率为2 500 Hz，而行程差 $D_2-D_1=5$  cm。在分频频率上延迟的相移为 $132^\circ$ 。计算：

$$\lambda=34\ 000/2\ 500=13.6\ (\text{cm})$$

$$\text{相移角 } \theta=5/13.6 \times 360^\circ =132^\circ$$

$$\text{延迟时间 } t=5/34\ 000=147\ (\mu\text{s})$$

$\lambda$ ——声波长。

式中取声速为340 m/s。

上述例子对于两通道扬声器系统来说是非常典型的。在这种系统中，于垂直面板上常配置直径160~170 mm的低音单元和球顶高音单元。图1-7示出了5 cm行程差的相频特性，根据此特性，可以确定在1 500~3 000 Hz频率间隔内相移延迟 $80^\circ \sim 180^\circ$ 的变化。由于频率轴具有对数刻度，使相频特性获得了非线性，而 $>3\ 000$  Hz的锯齿形曲线则与正负 $180^\circ$ 间假定的相位描述相关。由数量上的评估可以得出结论：在其他条件相同的情况下，信号合成时相位关系上的延迟会随着分频频率升高而加大。

下面将介绍滤波器的相频特性。

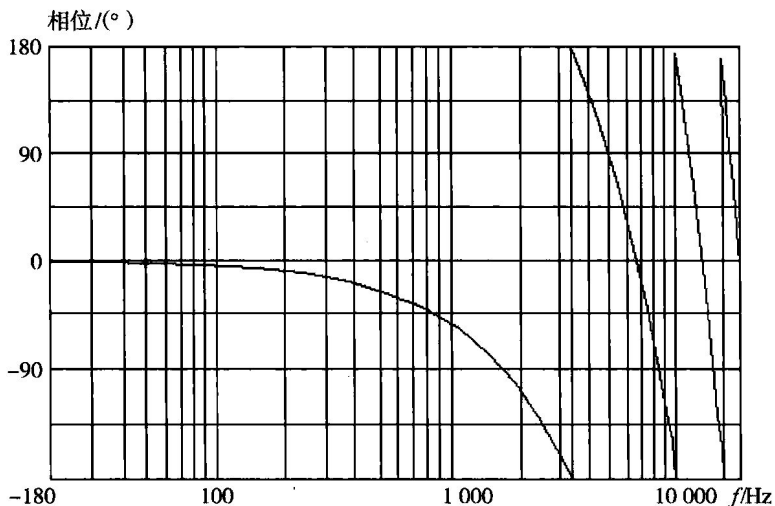


图1-7 5 cm (147  $\mu$ s) 延迟的相频特性

## 1.4 滤波器

在本节，将从分频器应用的视角去研究滤波器。与频率有关的滤波器传输系数通常称为传输函数，或传输特性。

应用滤波器理论的电动式扬声器单元的辐射求和方法，可以了解声信号和电信号求和的类似规律。此时，必须考虑电滤波器与电动扬声器相接时在输出端给出的声信号，声信号的幅频特性就是电动扬声器声压幅频特性上的滤波器传输函数的产物。所形成的相频特性就是滤波器的总相频特性和电动扬声器的相频特性。在这方面，远不是所有可获得的电信号都能实现声信号的。这是在音响爱好者中有着广泛认同的一阶滤波器的特点，Бать认为，这是由于一阶滤波具有共同辐射区域宽、放声系统简单的优势。

一阶滤波器技术参数可按式(1-1)和(1-2)计算:

$$C=1/6.28Rf \tag{1-1}$$

$$L=R/6.28f \tag{1-2}$$

式中  $C$ ——滤波器上限频率的电容容量;

$L$ ——滤波器下限频率的线圈电感量;

$R$ ——负载阻抗;

$f$ ——分频频率。

在分频频率上,滤波器的传输系数等于0.707或-3 dB。一阶滤波器传输特性的滑落斜率为每倍频程6 dB或每10倍频程20 dB。这种滑落斜率的确定反映了预期的对数刻度内的滤波器传输函数。对于线性刻度来说,这就意味着在传输特性滑落处频率变化了2倍,滤波器的传输系数减小了一半。

一阶滤波器的相频特性如图1-8所示。

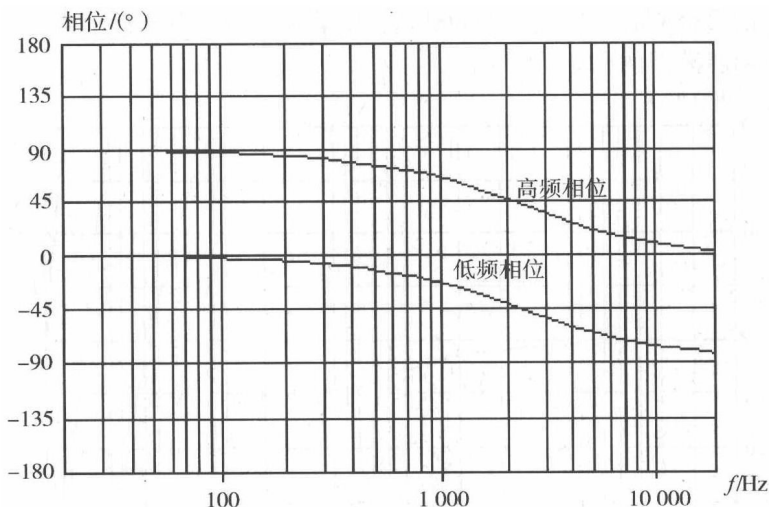
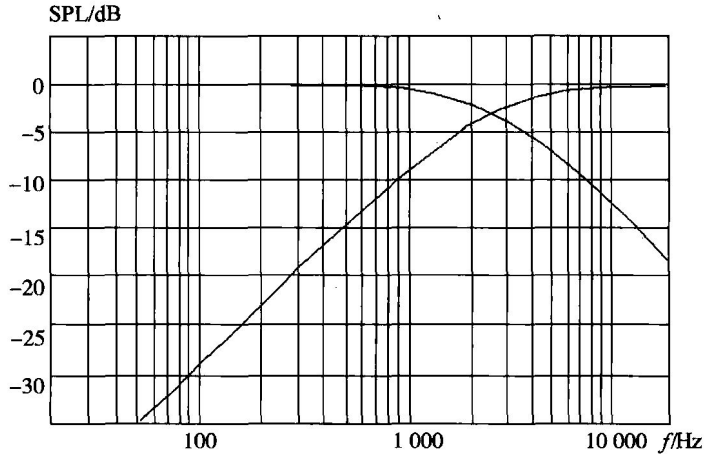
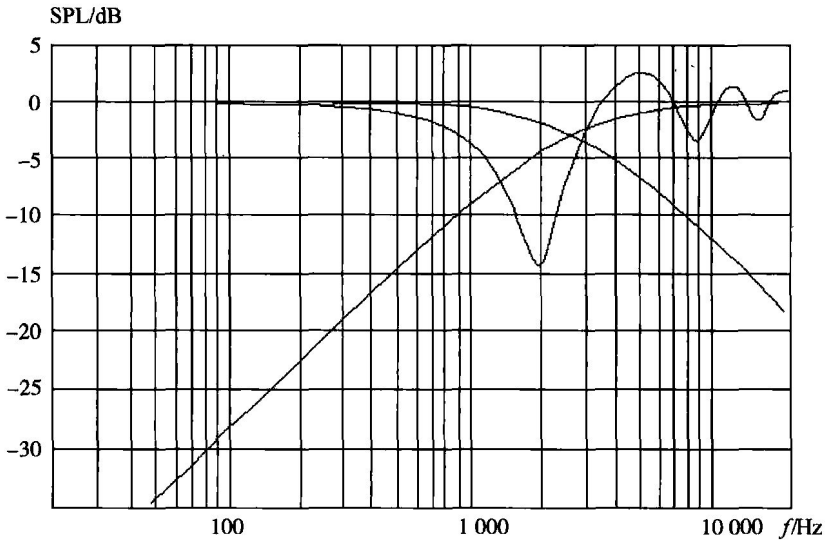


图1-8 一阶滤波器的相频特性

图1-9示出了分频频率为2 500 Hz的一阶滑落的复合幅频特性。这种理想化情况给出了获得平坦的求和特性及没有相位失真的极好的复合结果。遗憾的是,只能对电信号才可实现图1-9上的一阶滤波器的全部优点。对于声信号,会出现与传播延迟有关的重大难点。在很宽的共同辐射区域条件下,一阶滤波器的延迟特性将严重影响幅频特性。举例说明如下:

前面谈到了延迟并阐明了5 cm (147  $\mu$ s) 的行程差,对于两分频系统来说这是足够典型的情况。图1-10示出了考虑低音扬声器单元辐射延迟147  $\mu$ s的一阶滑落的复合幅频特性。所获得的总幅频特性是很不满意的。由延迟造成的相位移是在共同辐射区域中干涉的原因。

如图1-6,在回程差等于零的 $M_2$ 位置上,应注意关于倾斜面板的箱体结构和专为补偿传播延迟制作箱体的其他方法。除了箱体结构措施外,可采用结构较复杂的相位校正回路。

图1-9 滑落复合的一阶滤波器幅频特性 ( $f=2\,500\text{ Hz}$ ,  $T_{\text{delay}}=0\text{ }\mu\text{s}$ )图1-10 分频频率 $f=2\,500\text{ Hz}$ 、延迟时间 $T_{\text{delay}}=147\text{ }\mu\text{s}$ 的一阶滤波器复合滑落的幅频特性

要获得图1-9示出的一阶幅频特性的滑落形式是很难的，这是因为它们是扬声器单元幅频特性与滤波器传输特性相乘的结果。为了获得根据声压的一阶滑落，必须显著提高对宽带电动式扬声器的要求。显然，在市场上工厂生产的用于一阶滤波器的扬声器并不多见不是偶然的，而且这种扬声器的价格也不便宜。很少扬声器制造者能生产既适合一阶滤波器工作，又能成功地解决与共同辐射区域宽广问题有关的扬声器单元。

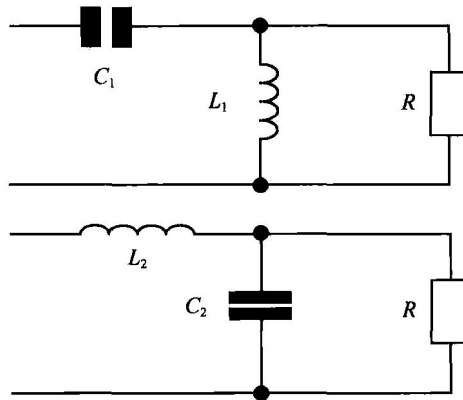
音响爱好者已注意到一阶滤波器平缓滑落对高音单元中频过载的较弱保护有利，因此许多产品手册中指明这个高音单元的功率是在二阶滤波器条件下制作的。

二阶滤波器的电路和计算公式如图1-11所示。所有滤波器计算公式设定如下的量纲： $C$ ——法拉(F)， $L$ ——亨利(H)， $f$ ——赫兹(Hz)， $R$ ——欧姆( $\Omega$ )。在设



计分频器时必须考虑, 滤波器的计算只适用于纯阻负载, 同时电动式扬声器的输入阻抗具有明确表示的电抗分量。

二阶滤波器的电路



二阶滤波器典型的计算公式

Linkwitz-Riley ( Линквист, Рей - лир )	$Q=0.49$	$C_1=C_2=0.079/Rf$	$L_1=L_2=0.318R/f$
Bessel ( Бессель, 贝塞尔 )	$Q=0.58$	$C_1=C_2=0.091/Rf$	$L_1=L_2=0.276R/f$
Butterworth ( Баттерворд, 巴特沃兹 )	$Q=0.707$	$C_1=C_2=0.112/Rf$	$L_1=L_2=0.225R/f$
Chbyshev ( Чебышев, 契比雪夫 )	$Q=1.0$	$C_1=C_2=0.159/Rf$	$L_1=L_2=0.159R/f$

图1-11 二阶滤波器的电路和计算公式

二阶滤波器的特征是由分频频率 $f$ 和品质因数 $Q$ 值决定的。图1-12示出了品质因数为0.49、0.58、0.70、1.0时分频频率为2 500 Hz的几种二阶滤波器的传输特性。滤波器的品质因数影响着分频频率附近的传输特性。滤波器的这种特性可以用来校正电动式扬声器单元的幅频特性。

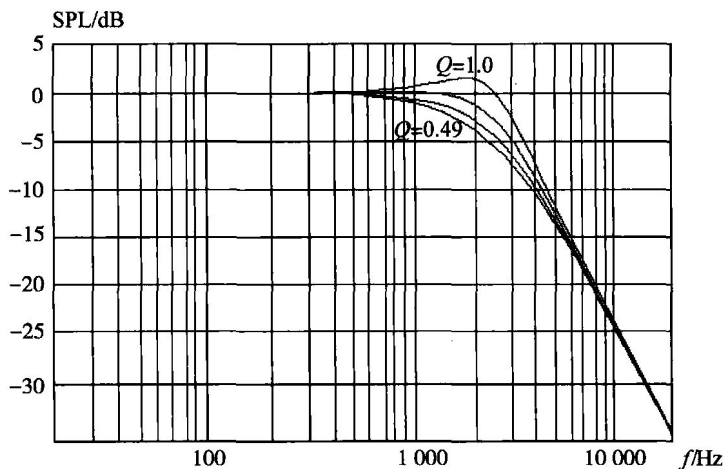


图1-12 二阶滤波器的传输特性