

编号： F770036

密级： 内 部

厅堂扩声系统设计译文集

(之一)

声学研究室

同济大学科技情报组编印

一九七七年七月

厅堂扩声系统设计译文集（之一）

编 译 说 明

厅堂声学设计通常总是包括大厅的音质设计和扩声系统设计两大方面的问题。前者和建筑设计密切相关，后者则往往涉及许多电子设备的设计、生产和使用等问题。

自从建国十周年首都北京十大工程设计以来，我国厅堂声学工作有了很大进步。为了使厅堂声学设计提高到新的水平，以更好地满足集会和演出场所的使用要求，有许多技术问题需要探索和实践。这里有普及和提高的问题，即既要为大量的基层会堂和中小城市剧场的厅堂声学设计服务，又要为现代化标准很高的大厅服务，包括近年来不少涉外工程中的大中型厅堂。

我们结合当前的工作，搜集了一些国外厅堂声学设计的资料，把一些有实用价值的文章译出，供兄弟单位交流。

本辑内容集中在厅堂扩声系统设计。主要包括下列四个方面：

- (1) 厅堂扩声设计的内容及步骤；
- (2) 扬声器（声柱）的布置及分析，以及有关实例；
- (3) 扩声系统设计中有关参量（声压级增益、临界距离、房间常数等等）的计算。
- (4) 声柱设计中的一些技术问题。

至于扩声系统中的一些其它技术措施和设备，例如多频率补偿和均衡处理，声延迟装置、人工混响、自动音量压缩、频移和相移装置、分频网络等等，对于提高扩声效果的质量来说是非常重要的和必要的。其中一部份设备国内虽已有生产，但质量亟待提高，另有不少一部份项目还是空缺。这些问题要由电子工业部门配合设计和生产。本辑限于篇幅和条件，这方面专题论文未曾包括在内。

本辑内容大多选自美国声频工程学会杂志。对反映国外水平和动态有一定的代表性。当然，由于我们的水平和能力有限，编译中一定有不全面和不恰当之处，请大家多多提出宝贵意见。再则所选文章中，有些提到国外教堂中语言扩声设计的问题，似乎对国内毫无实用意义；但我们考虑，如果从长混响时间（这些教堂中的问题往往是混响过长

引起的)中搞好语言扩声的方法这一点来看,还是有一定参考价值的。因为国内大量基层单位的会场中(如礼堂、饭厅),也普遍存在着这方面问题。

国内有关扩声设计的专门书籍很少,过去也曾有过一些这方面的专题译文,但散见各处,不易查找。下面选列了三份资料名称,它们是比较全面地介绍扩声设计文章,也是公开出版过的,因而容易查得。我们认为这些文章至今仍有相当参考价值,故在此推荐并作为一个索引提出来。

1. 大型厅堂的扩声设计。见“电信科学”1957年2期。

2. 高质量语言扩声系统的设计。见“近代实用建筑声学”一书的第八章(中国工业出版社,1963年)。

3. 电声工程进展。见“声学译丛”——电声学专集第二期(总编号24期),(上海科技编译馆出版,1965年)。

本工作得到上海人民电台、上海工业设计院和上海民用设计院的支持和协助。

一九七七年五月

目 录

(按发表先后排列)

	页次
1. 扩声系统的传声增益	(1)
2. 小会议室的宽频带均衡处理	(11)
3. 扩声系统扬声器位置的分析	(13)
4. 苏联克里姆林宫大会堂的扩声系统	(33)
5. 长混响房间中的扩声系统	(45)
6. 无障板声柱	(59)
7. 声柱—实用设和应用	(63)
附: 对此文的意见及答复	
8. 文艺演出扩声系统用的三频道声柱	(73)
附: 对此文的意见及答复	
9. 32500人集会场所的扩声系统	(93)
10. 厅堂扩声系统设计	(105)
11. 计算房间常数的更精确公式	(121)
12. 美国旧金山圣马利教堂扩声系统设计	(131)

1

扩声系统的传声增益

c.p.Boner and R.E.Boner

原载美国声频工程学会杂志 17 卷 (1969 年) 2 期

对室内扩声系统在反馈之前的系统传声增益提出了一个简单的计算公式。这个公式对工程设计来说已足够精确。并介绍了为达到所计算的系统传声增益而采用的系统均衡处理方法。文中还略述了对整个扩声系统的传声增益的实验校核步骤。

引言

在一套经过恰当均衡处理的扩声系统中, 反馈之前的系统传声增益〔1, 2〕乃与室内声学、扬声器相对于听众和传声器的位置以及换能器和放大器的特性等有关。反馈之前系统传声增益的大小可用一简单步骤方便地算出, 这对设计来说是很合用的。

室内的声级

如室内由一个具有指向性 Q 的声源所激发, 室内的相对声压级可由下式〔3〕给出:

$$\text{相对声压级 (SPL)} = 10 \log_{10} \left(\frac{Q}{4\pi\gamma^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (1)$$

式中, $R = \text{房间常数} = \frac{S\bar{\alpha}}{1-\bar{\alpha}}$ (米²), $S = \text{室内所有界面总面积 (米}^2\text{)},$

$\bar{\alpha} = \text{房间表面的平均吸声系数}, \gamma = \text{从声源的声学中心到测量声压级点上的距离 (米)}, Q = \text{声源的指向性因数}.$

对于室内靠近扩声系统扬声器的听众位置来说, 其声压级是随着扬声器至听者的距离平方值 (γ^2) 而反比下降。当扬声器至听者的距离增大到一定数值, 即所谓离扬声器“相当远”时, 声压级就比反比平方分布方式所估计的下降量要小得多。对一定房间常数 R 来说, 相对声压级的极限值 (最低值) 渐近于根据 $10 \log_{10} \left(\frac{4}{R} \right)$ 所算出的数值。此极限值即属于在房间常数 R 时的室内混响声场条

~ 1 ~

件下的声级。

实际上，混响声能密度与听者位置大致无关，除了由室内驻波、障碍物引起“声影区”、自扬声器至听者途中的空气吸收、以及自扬声器所发声束遇上了原应为建立混响声场而必须是反射的表面却成了吸收面时等等原因所产生的变化。

一个扩声系统的主要作用是要在听者位置上提供一个足够强的早到声级〔4〕。扬声器的指向性 Q 对此的作用尤为重要。设计中，要注意保证扬声器直接“看”得到每一位听众。这样做（在声学上很难处理的房间中也只能这样做），对最佳听闻条件所要求的早到声原则便能够充分发挥作用。扬声器的指向性 Q 对于建立室内混响声场是不搭界的。

在设计扩声系统中，如果扬声器是布置在使传声器和室内每个座位都处在如(1)式所描述的混响声场中，则扬声器所产生出的声压级在传声器位置上大致上和室内每个座位上相同。这样，根据有关扬声器位置的这种要求而设计的扩声系统，实际上就好比将每位听众的耳朵放到传声器位置上去，而听众本人则仍留在他的座位上。这种情况可说成是有良好效果的电声“支解”作用。声学特性问题有了如此了解以后，演讲者的工作就简单多了，只要在传声器位置上根据他的希望使听众通过扬声器所能获得的声压级多少，而尽量地给以满足。如果演讲者站得离他的传声器相当远，则他就远远地不能在传声器位置上产生出足够的声压级来，以使扩声系统能在听众位置上达到足够大的声级。如果“平方反比”的声场分布规律在演讲者和传声器之间是做到了，则演讲者如离他的传声器后退很多，所产生出的声压级下降程度就很快。

如果在传声器位置上，房间所带来的背景噪声级已知时，则就很容易说明一个演讲者按一定声功率输出时，应站在离他的传声器要多少近，才能使所有座位上都能满意地听好。扩声系统所送到的每个座位上的声级地具有和传声器处所存在的背景噪声相接近，除非另作特殊措施。一般的经验是根据一点来均衡扩声系统，在该处它也接恰了空调和其它声源的背景噪声。均衡处理所达到的有用范围也

是指该点上而言。

自激振荡和激振铃声* (振铃)

扩声系统由声反馈经“房间途径”而产生的稳态振荡将在几个符合自激振荡的 NYQUIST 评价标准^[5]的频率上出现。在这样的频率上，由演讲者和扬声器分别送到传声器上的声压级都相等。当扩声系统在该自激频率上根据本文所介绍的方法（按一级近似）而设计和均衡处理的，则该声压级也就是室内送到每个座位上的数值。如果要防止某一频率的自激振荡，可用直接针对该频率的几种均衡处理。对于其它相位条件^[5]不符的频率，就稳态反馈振荡来说并不需作什么处理。但是，在某些情况下，扩声系统的振铃声方式，就必须注意均衡处理反馈方式和振铃声方式是正弦波性质的。通常房间内在振铃声方式频率下的衰减率约在几千毫秒的数量级，即使在包括这样一个啸叫方式的频带内的房间“正常”混响时间低至1秒或以下时也有那么大的衰减率。房间及其扩声系统在振铃声方式频率下的嗡嗡叫使在这样的房间内要听懂语言带来严重困难，即使那时的反馈临界条件离扩音机音量控制器的工作位置还相当远而并无多大问题。用了一些带宽约5赫的适当狭带滤波器^{[1][2]}可将这些振铃声方式的振铃时间降至相当于室内混响时间所具有的“一般”数值。有6分贝左右的插入损失一般就可和房间的衰减率相称，即扩声系统在振铃声方式频率下的衰减率和房间在稍离振铃声方式频率下的衰减率相称。如果所用插入损失比相称所要求的值大，则房间在振铃声方式频率下太“干燥”，因此滤波器本身要限制在很低数值范围（即比“一般”房间本身低得多的数值）。

系统的增益

希望有一种扩声系统在传声器处和每个座位上的声压级于很宽频谱范围内都达到相等，而不是仅仅一个频率或少数几个频率上达到相等。在这种情况下，包括绝大多数声频频带范围的放大器增益

* 有时俗称嗡嗡声——译者注

将开到一定数值，以驱动扬声器达到所需要的声级，使室内每个座位上都具有演讲者在他传声器位置上的声压级。

在相当多的经过仔细设计和均衡处理的扩声系统中，我们已提出扩声系统关掉时在传声器位置上所要达到的某一声压级（用倍频带测量无规噪声）。然而开启扩声系统，将音量控制器开到反馈临界点，测量送到各座席上的相应倍频带声压级。发现这些声级和以前在扩声系统传声器位置上实测的倍频带声级是一致的，相差 ± 1 分贝之内，除了出现某些室内音质问题（如上述）的情况之外。尤其是用了两格、三格和四格号筒的扬声器，测量传声器处（扩声系统关掉）和各座位上（扩声系统开启并开到反馈临界点）声压级的相等性，乃是校核扩声系统设计方面和均衡处理效果方面的良好办法。如果设计有意要规定送给座席某一部份有较高的早期声声压级，以免受聚焦回声、长延迟回声之类的干扰，这种情况就应在对送给座席上声级的测量工作中考虑进去。

我们认为用“在传声器（扩声系统关掉）处和座席各处（扩声系统开）倍频带声压级的相等性”方法来说明扩声系统特性，要比我们过去以理想设计的扩声系统在反馈出现之前的系统增益概念那种方法要简单。当然这两者是相当的。反馈出现之前的系统增益可根据过去文献〔2〕中所介绍的资料来计算。计算的参量有扬声器至传声器的距离、房间常数和扬声器及演讲者的指向性因数。由于扬声器组（或分散式系统中的许多个扬声器）应只复盖听众席以送给听众要所求的早期声，我们任意地假定一个指向性因数 $Q = 5$ 。为了简化起见，假定演讲者的 Q 也是5。至于其它 Q 值下，发生反馈出现之前系统增益的数值要作适当修正。我们还假定听者和讲者处的 R 值是一样的。当然，实际上并非总是这样的。如果可以做到讲者和传声器处的房间常数比之听众席上的要低，则可使反馈出现之前的系统增益有所改进。Berauek曾指出舞台上的这种情况就影响到声学环境〔6〕。

从物理意义上来说，一个合适设计和合适均衡处理过的扩声系统所产生的“放大作用”大致如下。听者和讲者传声器都在扬声器

的混响声场中。传声器位置上收到扬声器送来的声压级比在远处座位上的没有显著下降。但是，未经扩大的讲者声输出在达到它建立室内自身混响声场之前必然有首先服从反平方下降规律的一段途径。扬声器在它到达传声器处建立其混响声场条件之前也是服从反平方定律下降的。因此，在大多数座位上，讲者未经扩大的声压级必定比由扬声器送来的要低得多。这个差值（以分贝计）就是反馈之前的系统增益。讲者声音到达他的传声器之前几乎是按反平方下降的。讲者到传声器的距离的重要性后面再谈。

讨 论

有一套扩声系统，其中央号筒喇叭放在室内前面H位置上（参见图1），讲者在S处，听者在L处。假定S处的功率级为 PWL_S ，号筒喇叭的功率级为 PWL_H 。令沿着 α 线上随距离而下降的声压级用符号 Δ_α 表示。由声源S和由号筒喇叭H送到传声器处的声压级分别为：

$$SPL_S = PWL_S - \Delta_d(s) \quad (2)$$

$$SPL_H = PWL_H - \Delta_\gamma \quad (3)$$

在一套经过适当均衡处理的扩声系统中，

$$SPL_S = SPL_H \quad (4)$$

因此，

$$PWL_S - \Delta_d(s) = PWL_H - \Delta_\gamma$$

$$PWL_H = PWL_S - \Delta_d(s) + \Delta_\gamma \quad (5)$$

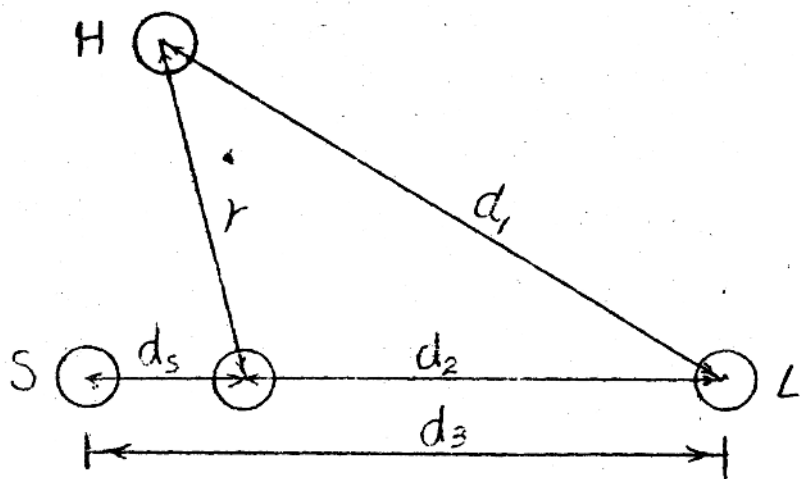


图1. 扩声系统换能器、讲者和听者的位置图

在听者位置 L 处的声压级为:

$$SPL'_H = PWL_H - \Delta\alpha(1) \quad (6)$$

和, $SPL'_S = PWL_S - \Delta\alpha(3) \quad (7)$

因此, $SPL'_H = PWL_S - \Delta\alpha(3) + \Delta\gamma - \Delta\alpha(1) \quad (8)$

反馈之前的系统增益 $S \cdot G$ 规定为:

$$S \cdot G = SPL'_H - SPL'_S \quad (9)$$

因此 $S \cdot G = \Delta\alpha(3) + \Delta\gamma - \Delta\alpha(3) - \Delta\alpha(1) \quad (10)$

于是, 对室内经适当均衡处理的扩声系统, 在系统各部份位置按上述假定的情况下, 要定出其反馈之前最大的理论系统增益, 可按下列步骤进行:

1. 计算该室的房间常数 R .
2. 量出距离 d_s , γ , d_1 和 d_3 .
3. 根据(1)式算出或从表 1 读出 $\Delta\alpha$ 值.
4. 从(10)式算出反馈之前的系统增益.

表 1. 在不同房间常数 R 的室内, 对具有指向性因数为 5 的声源, 其声压级随距离 d 的下降值 Δ_d (dB)

d (米)	房 间 常 数 R							
	50呎 (4.7米 ²)	500 (47)	2000 (186)	10,000 (930)	20,000 (1860)	30,000 (2790)	50,000 (4700)	100,000 (9300)
1(0.3)	2.7(dB)	3.4	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
2(0.6)	7.0	9.2	9.4	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5
4(1.2)	9.3	14.3	15.2	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5
6(1.8)	9.9	16.7	18.3	18.9	19.0	19.0	19.0	19.0
8(2.4)	10.1	18.0	20.4	21.3	21.4	21.5	21.5	21.5
10(3.0)	10.3	18.6	21.7	23.1	23.3	23.4	23.4	23.4
20(6.0)	10.4	20.0	24.7	28.1	28.7	29.0	29.2	29.4
40(12.0)	10.5	21.3	26.0	31.4	33.0	33.7	34.3	34.9
60(18.0)	10.5	21.4	26.8	32.4	34.6	35.6	36.7	37.7
80(24.0)	10.5	20.4	26.4	32.9	35.3	36.6	38.0	39.4
100(30.0)	10.5	20.4	26.4	33.1	35.7	37.1	38.7	40.5
125(37.5)	10.5	20.4	26.4	33.2	36.0	37.5	39.3	41.3

试举一例, 一座 3000 座位大厅, 房间常数为 20000 呎² (1860 米²)。号筒扬声器位在传声器稍前面之上 40 呎 (12 米) 处。假定前排座位离传声器 20 呎 (6 米), 离号筒扬声器 40 呎 (12 米)。假定最远处座位离传声器 125 呎 (37.5 米), 离号筒扬声器 100 呎 (30 米)。从 (10) 式和表 1, 可得出反馈之前系统增益量与讲者离其传声器的距离成函数关系。这些值见表 II 所示。

如果扩声系统的均衡处理不是在号筒扬声器到达传声器的声压级等于讲者对此所提供的声级的点以外的地方调整的, 则表列反馈之前的系统增益数值乃为本例中按所提参量的条件下可以达到的最大值。

表II 对某一扩声系统在反馈之前的系统增益(S.G.)计算值

d _s 呎 (米)	反馈之前的系统增益(S.G.)	
	前座 (dB)	最远座位 (dB)
1 (0.3)	25.2	30.0
2 (0.6)	19.6	24.0
4 (1.2)	14.1	18.0
8 (2.4)	9.0	12.1
10 (3.0)	7.5	10.2
20 (6.0)	4.3	4.8

扩声系统送到听众席的声压级取决于讲者送到他的传声器上的声压级。如果讲者轻的讲者就不可能简单地无限制“变响”。如果在传声器处的室内噪声级是大的，则扩声系统同样会在所有听者位置上造成相近的噪声级。因此，舞台上的送风机、灯光控制桌及它的冷却风扇、后台的各类噪声等均应保持在低的噪声级水平。

对于分散式扩声系统来说，其中所有扬声器的布置是使传声器和每位听众都在最近一只扬声器的混响声场之中，反馈之前的系统增益计算公式和前面所介绍例子中将单只扬声器放在前面位置上时的情况一样。

如果一套扩声系统已用了单只传声器来均衡处理，则在扬声器的混响声场中增加第二只同样的传声器后，将使放大器输入端有3分贝的提高。于是在反馈临界范围，主音量增益控制器必须关小3分贝左右以资稳定。如果不用一只而用4只传声器，主音量增益控制器就要比用单只传声器时的临界开关位置关小总共6分贝左右。同时使用传声器有八只之多时，开关位置要关小9分贝左右以资稳定。虽然连续均衡处理可以补回一部份这种损失，但仍要关小一定数值。这个问题在会议室中较为突出，因为那里常要同时使用许多传声器而无操作人员控制。

参考文献

1. C.P.Boner and C.R.Boner: 用无源网络来减小扩声系统的反馈和室内振铃方式。 (Minimizing Feedback in Sound Systems and Room Ring Modes with passive networks).
美国声学学会杂志 JASA, 37 卷 131 页 (1965 年)
2. C.P.Boner and C.R.Boner: 用狭带滤波器来控制扩声系统中的室内振铃方式和反馈方式的方法。
(A Procedure for Controlling Room-Ring Modes and Feedback Modes in Sound Systems with Narrow-Band Filters.)
美国声频工程学会杂志 JAES, 13 卷 4 页 (1965 年)
3. L.L. 白瑞纳克: 声学 (中译本, 高教出版社) 349 页
4. L.L.Beranek: 音乐, 声学和建筑 (Music, Acoustics and Architecture) (1962 年)
5. R.V.Waterhouse: 混响房间内反馈啸叫的理论
(Theory of Howl-Back in Reverberant Rooms).
美国声学学会杂志 JASA, 37 卷 921 页 (1965 年)
6. 个别讨论。

2

小会议室的宽带均衡处理

D. Green

原载美国声频工程学会杂志 JAES 17 卷 5 期 (1969 年)

大型厅堂中扩声系统的单独均衡装置已逐渐在实用中采纳。但是, 小型公共场往往用的便携式设备或经济的设施, 所用元件的特性就成为主要问题。对各种这类房间的声学测量, 得出了一些典型的特性资料, 可用来说明一种折衷均衡处理的效果。

引

言

小型大厅、讲堂、会议室和教室等大量以语言扩声为主要用途的房间, 应用宽带均衡处理时是有若干问题的。首先是在这些系统的装置方面, 因为它们通常是投资较低的设施, 不可能象一个经过充分工程设计的系统那样化费时间去搞。其次是在这些系统的使用方面, 因为使用者往往没有受过声学方面的训练。

如果要把这些房间中已有的通常不得用的装置更换为具有一定自然度和反馈啸叫之前起提高增益作用的系统, 就必须想出一种简化均衡处理、复盖范围均匀分布和操作控制的方法。本文限于均衡处理方面。本工作的目标是定出按三种不同简化程度的均衡方法。第一给按装者提供一组包括各声频频谱的宽带滤波器, 其频率响应则限制在根据声学调测结果所定范围。第二档是改变常用的低音和高音 800 赫分频控制器, 这样可更密切地接近于实际调试中所得出均衡范围。第三步便可得出一个折衷均衡处理, 使在所用的各种房间中均有满意的效果。

为了实现这一目标, 又继续对下列几类具有代表性的房间作了声响应的调查: (1) 中学教室, (2) 中学会堂, (3) 教堂和公共集会室, (4) 旅馆会议室, 和 (5) 大学讲堂。

声 学 测 试

初步调查的五间房间包括一间教堂的集会室，一间中学会堂，一间旅馆会议室，一间公共集会室，和一间中学教室。

为了测试这些房间配凑了一套标准的扩声系统，其中用了一个心型传声器 (Shure 545 型)，一台固定均衡处理的扩大器 (Ampli-Vox S402 型)，和一条声柱 (Ampli-Vox S1200 型)。扩大器为噪声源提供了一个输入口。用 125 赫到 8000 赫倍频带的录音磁带送进这个输入口。在每个房间中，扬声器放在可以产生均匀空间分布的位置上，它是根据声级计 A 挡计权所测得的声级来决定的。

所用扬声器是一条由六只直射式纸盆扬声器所组成的线列声柱，它的自由场轴向和平均能量密度响应曲线见图 1 所示。声柱是用按频率作“锥形”分布的措施，所得极座标指向性图案如图 2 所示。对本文介绍的所有测试场合来说，此指向性足以使直射声比混响声至少大 3 分贝。

在房间中央用声级计和滤波器组作一次响应读数。在调试后期，用了一个带有无规噪声输入的 $\frac{1}{2}$ 倍频程滤波器接到扩大器上去。

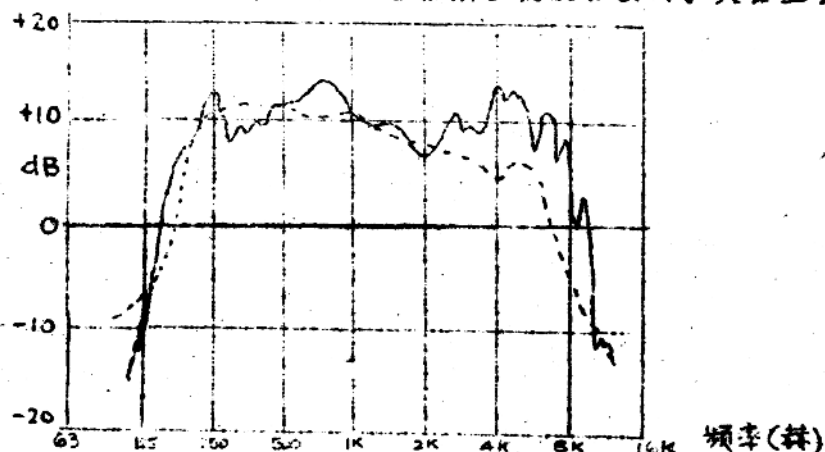


图 1. 测试用声柱的频率响应。 实线：1 米处轴向响应

虚线：在混响场房间中总的功率响应。

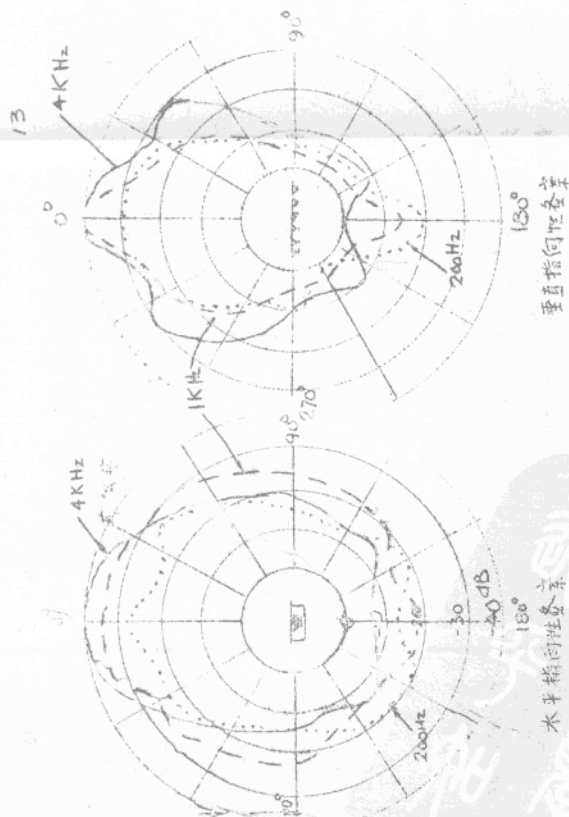


图2 用于测试的声柱的极座标图案。

教堂集会堂

教堂大厅是有一小楼座的两层楼房。讲道坛和上层同材料。正厅尺寸是 $4.5\text{米} \times 10.2\text{米} \times 10.8\text{米}$ 。座位容量280个。扬声器装在靠近平顶的阁楼内，（那里原是放电子风琴扬声器的），朝向对面后座。讲道坛和扬声器直接下面一点之间的距离是2.4米，讲道坛至扬声器的高度是4.2米。1000赫兹衰减时间为0.55秒。

根据传声器的轴向响应和扬声器的平均能量密度响应，用均衡处理得出一个平直的响应曲线如图3所示。

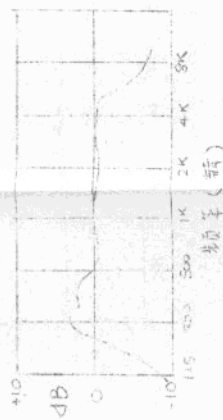


图3 在一间教堂大厅中扩声系统的倍频带响应

学校集会堂

第二次工作表是在一座近于矩形的学校会堂中进行的，它的尺寸为 $16\text{米} \times 18\text{米} \times 3\text{米}$ 高。座位容量约550个。座位是沙发式软座，墙面是硬粉调点。1000赫兹时实测的混响时间为2.0秒。

原来计划是讲台后墙上的声柱挂离到台面以上约4.5米处。但由于这个位置易于招惹扬声器之麻烦，学校行政当局表示宁愿采用一种在讲台后墙上的声柱挂离到台面以上约4.5米处。但讲台，略作侧斜使其指向对着大厅后座。全厅除前面两角外，在500、1000和2000赫兹频率带中的声压级分布变化均小于4分贝。图4所示为正厅中央标在系统的响应曲线。