

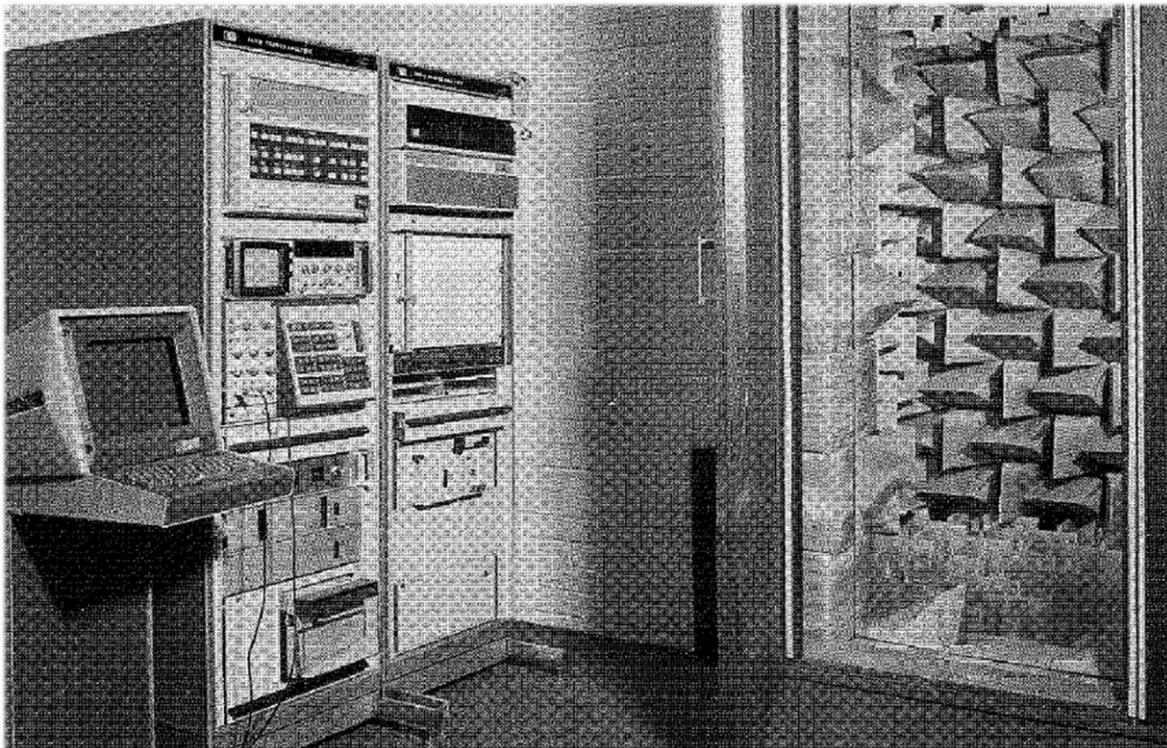
Une approche de la conception des filtres par la fonction cible

En 1971, KEF a commencé à expérimenter des techniques numériques assistées par ordinateur pour évaluer les enceintes acoustiques. Le calcul numérique étant devenu un outil accepté dans presque toutes les études de conception, pourquoi cette technique très précise ne pourrait-elle pas être appliquée à la conception d'enceintes de haute qualité ?

Il est évident que le produit final de toute conception sophistiquée et technique d'enceintes acoustiques doit être une qualité sonore subjectivement acceptable pour l'oreille. Cependant, KEF a estimé que le processus d'assemblage de chaque composant d'un système de haut-parleurs pouvait être suivi objectivement et avec une réponse cible finale en tête.

Essentiellement, un système de haut-parleurs doit posséder une réponse en fréquence d'amplitude plate, de sorte qu'il n'introduise aucune coloration dans le programme qu'il reproduit ; il doit être capable de reproduire à des niveaux sonores réalistes ; et il doit être soigneusement compensé en phase pour éviter tout retard entre les haut-parleurs.

Cet article indique comment l'approche cible a été appliquée à la conception de filtres qui agissent comme des réseaux de séparation dans les systèmes de haut-parleurs.



Pourquoi les haut-parleurs ont-ils besoin de filtres ?

Jusqu'à la fin des années 1940, les tentatives d'amélioration de la qualité des enceintes étaient centrées sur l'utilisation de haut-parleurs à large-bande capables de reproduire l'ensemble du spectre des fréquences audio. Ces tentatives ont été continuellement contrecarrées par des problèmes de directivité et de distorsion de phase, de sorte que l'attention s'est finalement portée sur des systèmes à plus d'un transducteur.

Depuis lors, des haut-parleurs ont été développés pour reproduire certaines bandes prédéterminées du spectre. Cela a cependant soulevé un problème immédiat : étant donné une seule tension d'entrée de l'amplificateur, contenant des fréquences sur l'ensemble du spectre, comment les tensions et les fréquences appropriées seraient-elles attribuées à leurs haut-parleurs respectifs ?

Les complications.

Les premières tentatives étaient de simples filtres passe-haut et passe-bas qui traitaient les haut-parleurs comme des dispositifs à résistance fixe. À certaines fréquences, ces filtres provoquaient une diminution de la tension d'entrée pour un haut-parleur et une augmentation simultanée pour un autre. Ces fréquences sont appelées points de croisement.

Cependant, les haut-parleurs ne sont pas des dispositifs à résistance fixe. Leur impédance varie avec la fréquence et, par conséquent, l'amplitude de la réaction à la tension d'entrée. Cet effet introduit immédiatement un déséquilibre en réponse aux transducteurs. Le système de haut-parleurs n'aura donc pas une réponse en fréquence d'amplitude plate. Cela ne se produira que si les réponses en pression ont à la fois l'amplitude et la phase relative correctes, en particulier dans les régions de croisement.

L'approche de KEF.

Il est clair que pour concevoir correctement les réponses en pression, il faut en savoir le plus possible sur tous les composants du système avant de tenter de les combiner. La recherche d'informations précises et détaillées constitue l'épine dorsale de l'approche de KEF de la conception des filtres par la fonction cible.

L'information critique requise est la réponse en fréquence d'amplitude et de phase des haut-parleurs et de leurs sections de filtre associées. La mesure de la réponse en amplitude est assez simple depuis de nombreuses années, mais la mesure de la réponse en phase, en particulier pour les haut-parleurs, n'est pas facile.

Le principal problème a été le délai entre la réaction du haut-parleur et la collecte des informations résultantes. La méthode de KEF a toutefois permis de surmonter ces problèmes en mesurant la réponse impulsionnelle du haut-parleur.

Un court signal carré d'énergie contenant des fréquences sur l'ensemble du spectre audio est envoyé au transducteur. Étant donné la brièveté du signal, il n'est pas nécessaire de réaliser cette expérience dans des conditions anéchoïques, car le transducteur réagit et se stabilise bien avant que les échos (qui donneraient des informations trompeuses) n'arrivent au point de mesure.

La réponse du haut-parleur à cette salve de sons est recueillie par un microphone et stockée pour analyse. En effectuant de nombreux relevés et en calculant ensuite la moyenne, les erreurs expérimentales et d'observation peuvent être minimisées.

Cette analyse nécessite un ordinateur numérique et une technique mathématique sophistiquée appelée analyse de Fourier. Il suffit de dire que cette technique permet de calculer la réponse en amplitude et en phase à partir de la réponse impulsionnelle.

Bien que tout cela puisse sembler quelque peu théorique, il convient de noter un point important. La réponse impulsionnelle d'un haut-parleur, ou les réponses d'amplitude et de phase correspondantes, sont des descriptions complètes du comportement linéaire du haut-parleur. Connaître ce comportement signifie savoir comment le transducteur répondra à n'importe quel signal, qu'il soit de nature permanente ou transitoire. Il est clair que ce type de connaissance est primordial.

Il fallait ensuite étudier la relation entre la réponse en phase et en amplitude. Les transducteurs idéaux devraient avoir une réponse à phase minimale associée à une réponse d'amplitude particulière, car cela introduira le moins de retard relatif sur la gamme de fréquences couverte. Les résultats de cette recherche ont été surprenants. Les haut-parleurs de la production KEF se sont avérées être essentiellement des dispositifs à phase minimale.

C'est une chance, car dans un dispositif à phase minimale, les caractéristiques d'amplitude et de phase sont liées de manière unique et acceptable pour l'oreille humaine.

En termes de conception de réseaux de filtres, cela signifie que le transducteur peut être entièrement décrit en termes de réponse d'amplitude globale.

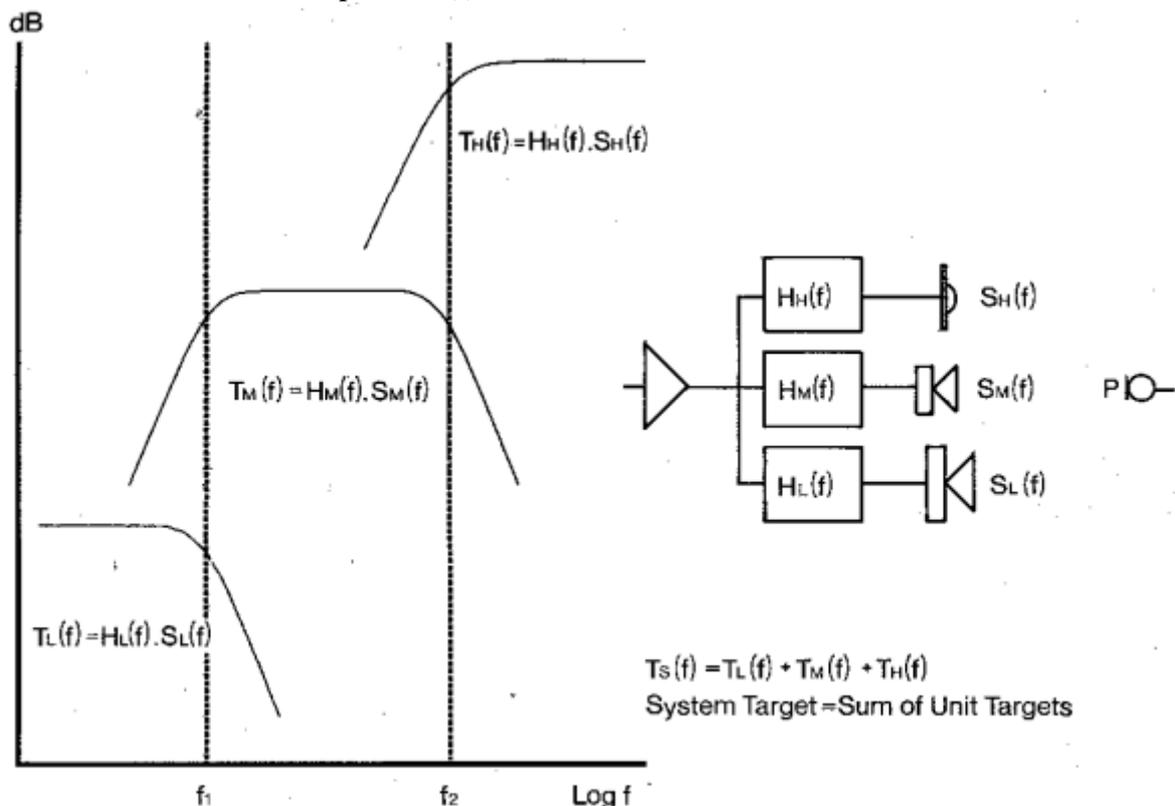
La fonction cible.

KEF définit la fonction cible comme la réponse en fréquence de l'amplitude souhaitée d'un transducteur à phase minimale, combinée à sa section de filtre à phase minimale.

Si $S(f)$ est la réponse en fréquence du haut-parleur dans son montage sans aucun filtre ; $T(f)$ est la fonction cible, et $H(f)$ est la réponse en fréquence du filtre à réaliser.

$$T(f) = H(f) \cdot S(f) \quad \text{ou} \quad H(f) = T(f) / S(f)$$

Puisque la réponse en amplitude $S(f)$, qui décrit le comportement linéaire complet du haut-parleur, est connue, et que $T(f)$ est définie, le problème est maintenant de synthétiser une section de filtre avec une réponse $H(f)$.



Autres problèmes.

Outre la variation de la résistance d'un haut-parleur en fonction de la fréquence qui a déjà été mentionnée, il existe d'autres considérations.

Chaque haut-parleur a sa propre fréquence de résonance fondamentale à laquelle l'impédance de la bobine mobile change soudainement et radicalement.

À certaines fréquences, l'inductance de la bobine mobile peut entrer en résonance avec les composants électriques du réseau de filtrage.

La pente de la réponse du filtre dans les régions de croisement doit être lisse, car toute irrégularité introduira une coloration dans le son.

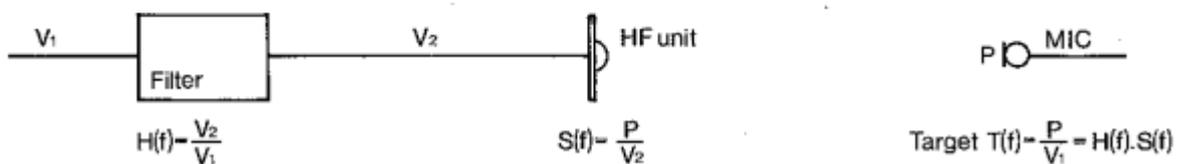
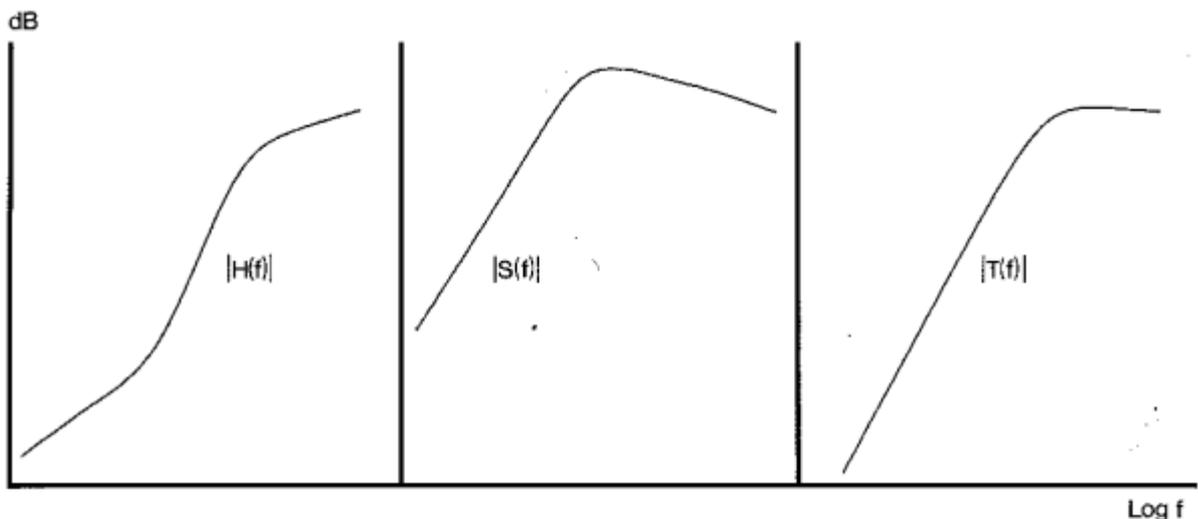
Les transducteurs et la réalisation pratique d'une fonction cible.

La réponse en fréquence globale d'un système de haut-parleurs est donnée par la somme des fonctions cibles individuelles produites par les différents transducteurs et les sections de filtre associées. Le filtre est un réseau passif de composants électroniques connecté entre l'amplificateur et le transducteur. Il a généralement trois fonctions.

Premièrement, il s'agit d'égaliser la réponse en fréquence non plate du transducteur sur son baffle, à la fois dans la bande passante et dans les régions de croisement.

Deuxièmement, pour produire la pente et la caractéristique de coupure souhaitées.

Troisièmement, pour maintenir une adaptation d'impédance correcte entre l'amplificateur et le transducteur.



Une classe de filtres ayant des caractéristiques appropriées pour les fonctions cibles est le Butterworth, ou type « maximalement plat ». La configuration de premier ordre, qui présente une pente de 6 dB par octave, semble être attrayante en raison de sa réponse en amplitude plate, de sa réponse en phase plate et de sa réponse en puissance constante. Cependant, le filtre du premier ordre souffre de trois inconvénients.

Tout d'abord, en raison de la faible pente, il devient nécessaire de contrôler les fonctions cibles individuelles sur trois octaves de part et d'autre de la bande passante allouée aux haut-parleurs. Par conséquent, pour un haut-parleur de médium couvrant une bande de 300 à 3000 Hz (sur trois octaves), le filtre devrait fournir une égalisation d'amplitude sur plus de neuf octaves, ce qui n'est pas du tout une solution pratique.

Deuxièmement, de nombreux haut-parleurs possèdent des pentes de coupure supérieures à 6dB par octave, de sorte que le filtre devrait fournir un signal positif ou un *boost* pour aplanir la réponse avant même toute mise en forme du filtre.

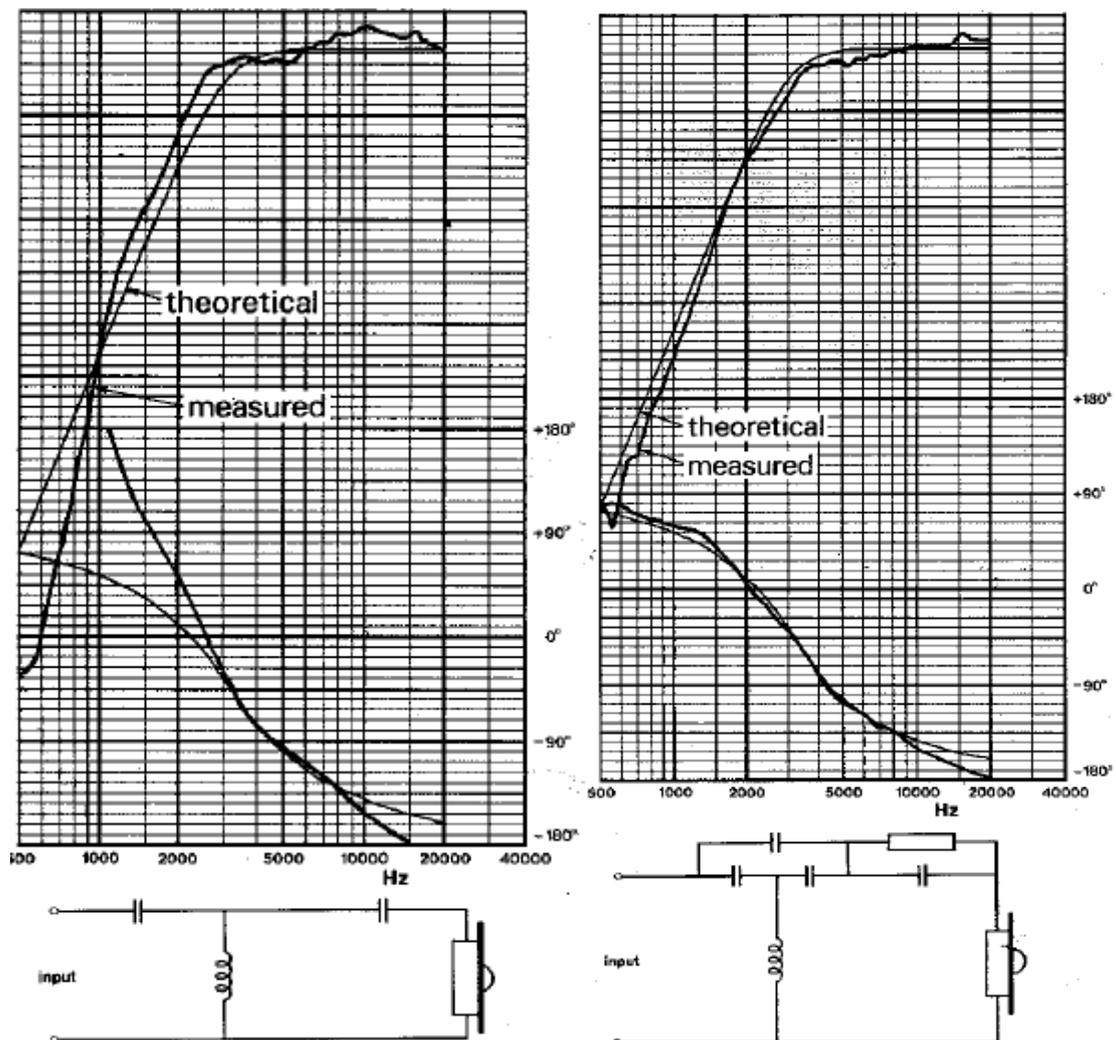
Troisièmement, l'unique inductance ou condensateur en série d'un dispositif de premier ordre n'est pas suffisant pour maintenir une bonne adaptation entre l'amplificateur et la charge résistive variable du système de haut-parleurs.

Le filtre Butterworth de 3^{ème} ordre.

En guise de solution à ces problèmes, le filtre Butterworth d'ordre 3 fournit le meilleur compromis. La figure de gauche montre un réseau passe-haut classique de 3^{ème} ordre et sa réponse mesurée comparée à la réponse théorique.

Aux hautes fréquences, la réponse est affectée par l'inductance de la bobine mobile qui, à 5 kHz, entre en résonance avec le deuxième condensateur du filtre. A partir de 3kHz, le roll-off du haut-parleur est incorrect et tombe finalement à près de 30dB par octave sous la fréquence de résonance fondamentale, alors que la pente théorique pour un réseau de 3^{ème} ordre est de 18dB par octave.

Cependant, à la figure de droite, la réalisation pratique d'un réseau acoustique de Butterworth montre un ajustement beaucoup plus proche de la théorie, à +/-1dB près, sur la majeure partie de la gamme de fréquences 500-20kHz. Ce filtre, avec sa pente de 18 dB/oct, réduit la zone de chevauchement entre les transducteurs à seulement une octave, ce qui est beaucoup plus pratique. Bien qu'il diffère du Butterworth de 1er ordre en ce que sa réponse en phase est celle d'un réseau passe-tout de premier ordre, il a été prouvé que ce n'est pas un inconvénient, car la différence de réponse en phase n'est pas détectée par l'oreille humaine.



Dispersion et position d'écoute idéale.

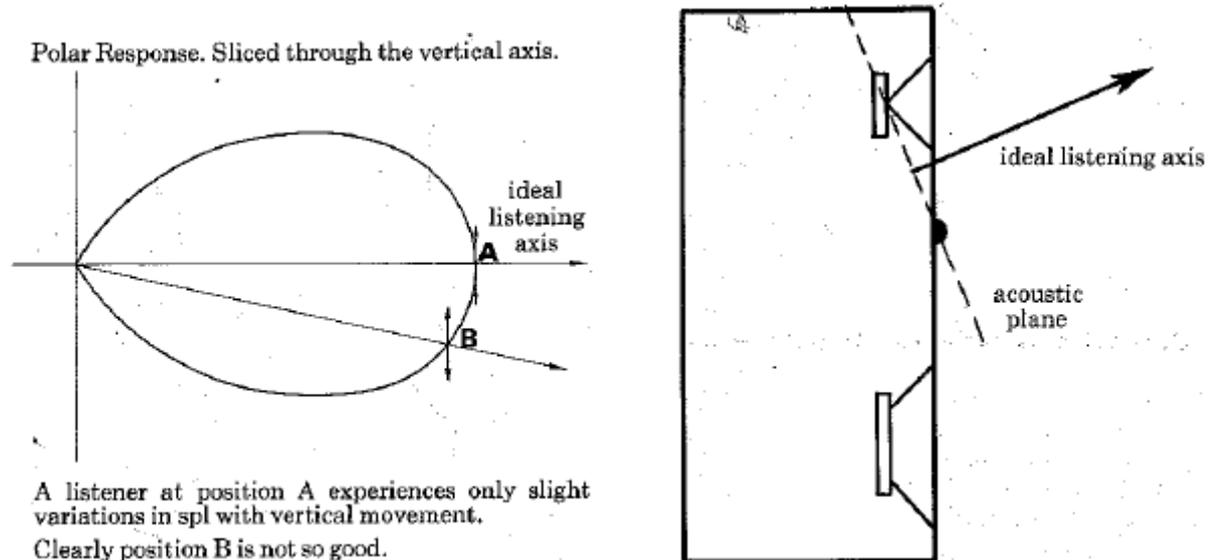
Les résultats de ce type de recherche ne sont valables qu'à une seule position d'écoute, celle du microphone pendant les expériences. Cependant, dans la pratique, si les transducteurs respectifs ont une dispersion suffisamment large sur toute leur largeur de bande, la réponse sera sensiblement la même sur un large horizon.

Mais en raison de la séparation géométrique inévitable des haut-parleurs sur le baffle avant, la dispersion dans le plan vertical ne sera pas aussi bonne. Elle s'avère être de ± 2 dB de la réponse sur l'axe sur un petit angle d'environ $\pm 3^\circ$ de l'axe principal.

Par conséquent, une caractéristique importante des systèmes conçus avec précision est que la fonction cible souhaitée du système ne peut être obtenue que dans une zone d'écoute limitée. Il est donc essentiel que l'axe d'écoute coïncide avec l'axe de conception cible, car bien que le son hors axe contribue à l'ambiance générale et à la qualité tonale, c'est le son direct seul qui est responsable des propriétés de formation d'image d'un système de haut-parleurs.

Le son total qui sort du système de haut-parleurs est généralement illustré par une réponse polaire du niveau de pression acoustique qui a généralement une forme différente autour de l'axe vertical et de l'axe horizontal. L'axe global (vecteur) du diagramme polaire devrait idéalement coïncider avec l'axe d'écoute, en particulier dans le plan vertical, car cela minimisera les changements de niveau de pression acoustique entendus par l'auditeur en se déplaçant légèrement vers le haut et vers le bas.

KEF s'est rendu compte que la direction de cet axe était dictée par le plan acoustique, qui relie les sources ponctuelles des transducteurs. Si on laisse de côté le transducteur des fréquences basses, dont la directivité n'est de toute façon pas audible, et que l'on considère uniquement les transducteurs de médiums et d'aigus, KEF a tourné ce plan acoustique à son avantage. La géométrie des haut-parleurs est ainsi modifiée sur la *Cantata*, de sorte qu'ils sont montés sur l'axe central, avec le médium au-dessus du tweeter.



L'auditeur dans une position d'écoute moyenne se trouve maintenant sur l'axe polaire. Dans d'autres enceintes dont les aigus sont au-dessus des médiums, les meilleurs sons sont souvent entendus au sol.

De plus, comme les trajets sonores des transducteurs médium et aigu sont égaux, l'auditeur ne subit aucun décalage entre les sources acoustiques, ce qui aurait pour effet de brouiller l'image.

Le montage sur l'axe central améliore la dispersion dans le plan horizontal. Comme il n'y a pas de retard relatif entre les sources, elle est large et le niveau de pression acoustique est très uniforme sur un large arc.

Pour l'écoute stéréo, KEF a créé une zone d'écoute socialement acceptable, à la fois large et profonde. L'époque où l'on s'asseyait à un endroit fixe (suffisamment grand pour un seul auditeur) est révolue.

De nouvelles recherches ont permis de créer une enceinte de pointe : La *Reference Series Model 105*, dans laquelle un certain nombre de caractéristiques ont été réunies par l'approche de conception de système global de KEF.

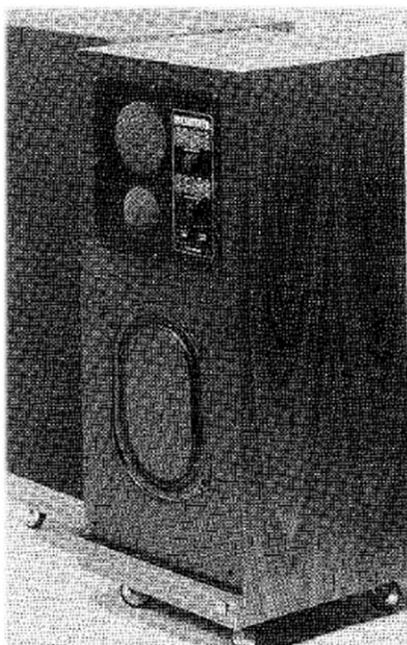
Le tweeter se trouve au-dessus du médium, mais il est décalé pour compenser le délai entre eux. En outre, l'orientation de l'ensemble des médiums et des aigus est réglable horizontalement et verticalement, de sorte qu'une fois encore, l'axe de réponse polaire peut coïncider avec l'axe d'écoute.

Dans le modèle 105, KEF a utilisé un filtre encore plus sophistiqué, qui, en conjonction avec la géométrie des haut-parleurs, donne une réponse polaire plus symétrique autour de l'axe principal. L'un des nombreux avantages de cette approche système est qu'une plus grande proportion du son direct (ou précoce) contribue à l'image globale.

Le nouveau filtre et la nouvelle conception du caisson de basses permettent également d'obtenir un effet spécial de chargement des basses, dans lequel les trois éléments, électrique, acoustique et mécanique, sont idéalement adaptés.

Le résultat est une réponse en fréquence plate jusqu'à 38 Hz à des niveaux réalistes. Cela était auparavant difficile à réaliser, car l'impédance du haut-parleur des basses change très fortement à de telles fréquences. La plupart des autres enceintes, pour éviter de devenir excessivement colorés à cette profondeur, sont conçus pour s'atténuer avant cela afin de présenter une réponse en amplitude raisonnable.

Les résultats de l'étude 105 sont surprenants. Ils représentent un autre exemple de la façon dont KEF a apporté la théorie du son et des mathématiques sophistiquées de manière très objective à un domaine intrinsèquement subjectif.



KEF Cantatas



Reference Model 105