

电—机械滤波器的分析与研究

李士德著

人民邮电出版社

人民邮电出版社

电-机械滤波器的分析与研究

著 者: 李 士 樵
出 版 者: 人 民 邮 电 出 版 社
北京东四6条13号
(北京市书刊出版业营业登记证出字第〇四八号)
印 刷 者: 北 京 市 印 刷 一 厂
发 行 者: 新 华 书 店

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{2}$ 1958年11月北京第一版
印张110/32页 21 1958年11月北京第一次印刷
印刷字数37,000字 统一书号:15045·总889—有184
印数1—2,000册 定价:(11)0.31元

緒 論

在我国，社会主义革命的胜利和社会主义建設的成就，迅速地改变了旧中国的面貌。目前我們又前进到一个文化革命和技术革命的新阶段。全国人民在党的总路綫的光輝照耀下，正在全国掀起了一个巨大的技术、文化和經濟建設的高潮。

通信工作好似国家的神經系統，毫無疑問，在社会主义的建設事業中將佔有重要的地位。在我国第二个五年計劃中，明确地規定了邮电事業要迅速地配合工農業的發展，邮电網要密佈全国各个角落，要使地方与中央，城市与乡村的距离，在時間上与空間上日益縮短。这就要求通信技术工作，也要貫徹多、快、好、省的方針，以适应目前的形势。

近年来，通信技术的發展，使通信工作者日益着重在有綫通信机器結構的改进方面，力求使机器的体积尽量縮小，电气性能更佳，电信綫路复用程度尽量提高，以更合理地使用通路。

多年来，由于許多專家的努力，使这方面的工作已取得了很大的成就。比如电气迴路的改进，应用一些小型化的电气元件，已經使机器結構日趋完善，尤其是半导体晶体管的应用，更代替了消耗电能較多，体积較大的电子管，使机器更趋于小型化。

可是到現在为止，濾波器这一部件还佔有較大体积，价值也較高。例如 TT-12/16 机器的濾波器，其体积約佔通路架的 50%，而重量更超过了 50%。所以如何能改进濾波器的特性，減小其体积，降低其成本已成为当前的重要課題。

許多專家在这方面作了許多工作，如用高导磁系数的材料作电感元件，或者改变濾波器的組成型式等，也解决了部份問題，但其效果还不能十分令人滿意。为了減小濾波器的体积以及当設計濾波器时，不再受电气元件的限制，我們必須找寻新的途徑，即利用对頻率具有選擇性能的其他部件所組成的濾波器来代替 LC 式濾波器。

数年前,机械振动具有电气上四端网络作用的这一问题的提出,啓发了我們找到了新的方案,这就是利用机械振动的固有频率这一性能所形成的滤波器部件来代替 LC 式滤波器应用到通信技术方面。在世界通信技术文献中,直到 1957 年才出现了無綫电频率方面的电——机械滤波器。

滤波器这一部件应用在有綫通信技术方面的广度及其重要性,尤其是对近代多路复用綜合通信体系方面所佔的重要地位是大家所共知的。电——机械滤波器本身具有很多目前 LC 式滤波器难以达到的优点,比如它的体积小,特性好,構造簡單而且經濟。如果能掌握电——机械滤波器的設計、制造与調整的技术,組成一套完整的体系,成功地应用到有綫通信技术方面,其价值当不低于半导体晶体管应用在有綫通信技术方面的价值。所以电——机械滤波器是有其广闊發展前途的。

本文主要任务是:

- 1) 分析已有的 LC 式滤波器。
- 2) 从物理概念及数学推証上对已有型式的电——机械滤波器作一分析。
- 3) 选择对音頻适用的电——机械滤波器的型式,研究和討論它的計算方法,并进行具体計算。
- 4) 研究調整方法,并进行測試調整。
- 5) 研究电——机械滤波器的特性与激磁电流 I_0 值及輸入电平值,終接阻抗值之間的关系。
- 6) 用实验方法来驗証計算公式。
- 7) 用实验方法研究另件的不精确和裝配不好时对衰耗特性的影响。

目 录

緒 論

第一章 現有一般 LC 式濾波器簡述	1
第二章 机械濾波器的物理基础	4
第三章 机械濾波器的数学分析和它的組成	9
第四章 用在音頻电报方面的机械濾波器	19
結 論	39
参考文献	40

第一章 現有一般LC式濾波器簡述

濾波器是建立載波通信最重要的組成部份。載波通信的發展與濾波器在設計與製造方面的改進有密切關係。

濾波器在電氣性能上來看，是一種無源四端網絡，它的特性是當正弦波電流通過這一網絡時，使某一頻率範圍的電流衰耗很小，而對其餘頻率的電流衰耗很大，實際上是截止。從頻率特性上來劃分，濾波器可分四種：

- 1) 低通濾波器，通過 $0 - f_c$ 範圍的頻率，
- 2) 高通濾波器，通過 $f_c - f_\infty$ 範圍的頻率，
- 3) 帶通濾波器，通過 $f_{c1} - f_{c2}$ 範圍的頻率，
- 4) 帶阻濾波器，阻止 $f_{c1} - f_{c2}$ 範圍的頻率。

後二者實際上是前二者的合成，如圖 1。

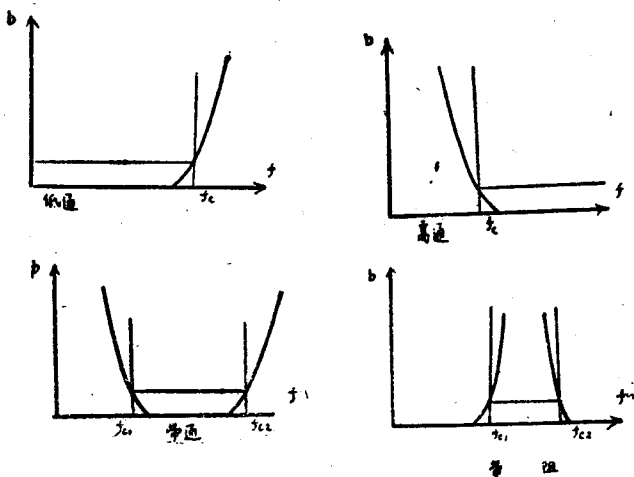


圖 1

這種濾波器都是由電抗元件組成的，利用電抗二端網絡的諧振特性，組成頻率的通過區域與衰減區域。由網絡的組成型式來看，目前

有三种基本型式:

1) 鍵型: ——包括K型与 m —导出型, 它較普遍地应用在載波通信中。

2) 桥型: ——由于要求元件的准确性及平衡性較高, 經常都轉化成等效电路, 或者用晶体来代替电抗元件用于較高頻率。

3) 差动桥型: ——由桥型等效轉換得出, 它的优点是所用元件数目少, 适于用在音頻及超音頻範圍內。

在音頻电报通信中, 在發送与接收兩方面所用的濾波器全是帶通濾波器。

發送濾波器的功用是阻止多余的高頻分量, 防止通路的过負載和非直綫性失真, 避免發送端各路間的相互分流作用。它的頻帶寬度可以稍寬一些, 它的阻帶衰耗約 3.5nep 即可。

接收濾波器主要是選擇本通路的頻譜, 阻止其他通路的电流流过, 防止干扰, 所以对頻率特性要求較高。通帶, 阻帶衰耗差应在 5.5nep 。

現用發送与接收濾波器的形式如下。

TT-12/16用的如圖 2。

美国西电公司出品的濾波器如圖 3。

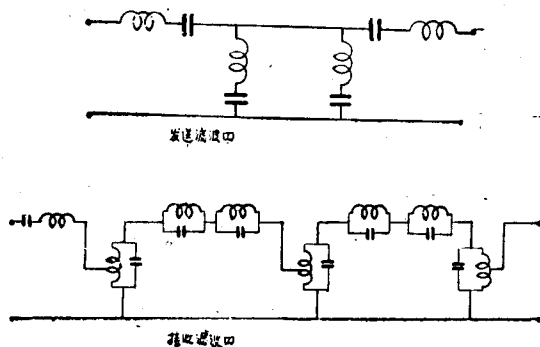


圖 2

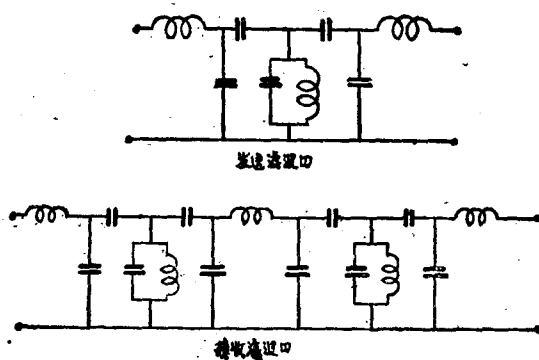


圖 3

德国出品的为差动式，其电路如图 4。

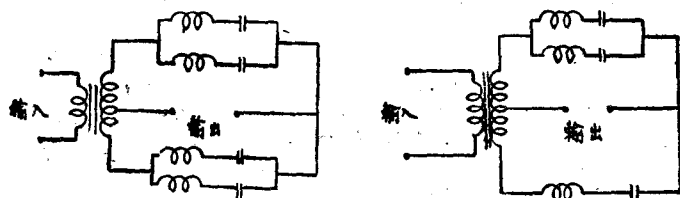


圖 4

对鏈式来讲，在对特性要求相同的情况下，用的元件較多，不同通路（不同通帶）所用不同元件也較多；而差动桥式用的元件較少，也可以調节，但稳定度較差，同时比鏈式对元件的質量要求高，对制造一个理想的变量器來說也較困难，而且差动式的阻帶衰耗还与衰减頻率特性的曲綫陡度有关。

LC 式滤波器的特性：

- 1) 頻率衰减特性同电感的 μ , Q 值有关；
- 2) 在阻帶內出現最小衰耗点（單节 K 型除外）；
- 3) 通帶时延随着頻率趋近于截止頻率而增加；
- 4) 通帶內起伏峯值与滤波器的級数及阻抗匹配情况有关；
- 5) 如要求頻率特性曲綫的斜率大，阻帶与通帶衰耗差大，則需增

加节数。

节数多則通帶衰耗、时延、体积都增加。

第二章 机械滤波器的物理基础

一个机械物体的振动，利用机电类比的概念，就可以化为等效电路来分析，这是大家所熟知的。

如果对具有一个自由度的物体，外加力为 $F = F_m e^{j\omega t}$ 則物体瞬間位移为

$$x = x_m e^{j\omega t} = \frac{F_m}{j\omega \left[R + j \left(\omega m - \frac{1}{\omega C} \right) \right]} e^{j\omega t}$$

x 相当于电路內的电荷 q 。

物体的移动速度为

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{F_m}{R + j \left(\omega m - \frac{1}{\omega C} \right)} e^{j\omega t}$$

v 相当于电路內的电流 i 。

在机械振动过程中，如果外加力的角频率 ω 值与机械固有频率 ω_0 值相同，可以肯定会出现力的諧振（相当于串联諧振）或速度諧振（相当于并联諧振）。

如果把具有一个自由度的物体联结起来，可以得到与無損耗均匀長綫的傳輸方程相类似的振动方程。

如圖 5，其中令阻尼 $R=0$

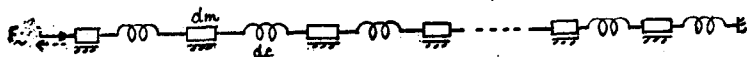


圖 5

則等效电路圖如圖 6。

註 ★…为参考文件的根据。

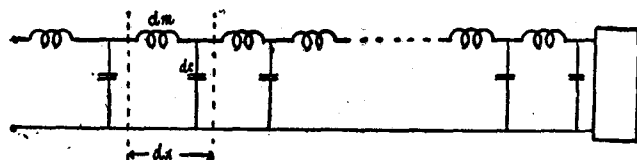


圖 6

以單位 dx 來分析，設 $z_1 = j\omega m_1$, $y_1 = j\omega C_1$

力 F_1 與 F_2 相差為 dF (見附圖)，即 $F_2 =$

$$F_1 + dF, \text{ 則二力之差 } F_1 - F_2 = -dF.$$

$$\text{故 } -dF = v \cdot z_1 \cdot dx,$$

$$-\frac{dF}{dx} = v \cdot z_1.$$

但當質量元件運動時，會使彈性元件壓縮，其量為 ds ，則作用于此元件的力 F 可由 $-dv$ 和阻抗 $\frac{1}{y_1 dx}$ 乘積求出

$$-\frac{dv}{dx} = F \cdot y_1$$

對 x 微分，並以 $r = \sqrt{y_1 \cdot z_1}$ 代入

$$\text{則得出, } \frac{d^2 F}{dx^2} = r^2 F, \quad \frac{d^2 v}{dx^2} = r^2 v,$$

上面微分方程的解為

$$F = A_1 e^{-rx} + A_2 e^{rx}$$

$$v = \sqrt{\frac{z_1}{y_1}} (A_1 e^{-rx} - A_2 e^{rx})$$

$$z_C = \sqrt{\frac{z_1}{y_1}} \dots \text{特性波阻抗.}$$

由上面各振動方程式可看出，它們與長綫電波傳輸方程是完全類似的。

當然把機械振動過程也可以化作等效四端網絡來分析，從電系統

中的四端網絡理論已知，如果

$$-4 \leq \frac{z_1}{z_2} \leq 0 \quad \text{的条件成立,}$$

在此情況下，網絡是無衰減，所以由機械振動組成的四端網絡是可以形成濾波器的。

1957 年，世界通信技術領域中已經出現了用在無線電頻譜方面的機械濾波器，機械濾波器振動元件的形式有圓柱式頸耦合，平板式綫耦合以及圓盤式的，用在音頻方面的有梯形諧振式，它們的簡圖如圖 7 所示。

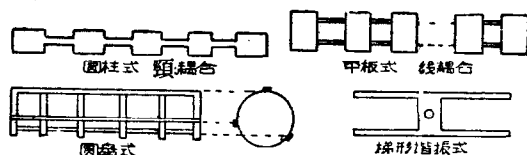


圖 7

對變量來講，一個電路比一個機械振動系統為簡單。在電系統中，只有一個獨立變量，例如是電流；然而在機械振動系統中，可以在縱，橫，扭轉三個方向中的任一個方向有振動。

下面按不同形式分別敘述：

1. 圓柱式——頸耦合：拿一個單元體來看，我們可以利用它的縱向振動與扭轉振動。當外加頻率與固有頻率相同時產生諧振，此時圓柱體週期的長度變化為最大。

具有兩個自由端的圓柱體，它的固有頻率決定於桿長 l 與沿着縱軸作機械振動的傳播速度 v_{np}

$$f_n = n \cdot \frac{v_{np}}{2l} = n \cdot \frac{\sqrt{\frac{E}{\rho}}}{2l}$$

上式中 n ……諧波數， E, ρ ……分別為圓柱體的彈性模數及密度。

縱向振動的基波諧振頻率
的桿長 $l = \frac{\lambda}{2}$ ，它的振動情
況如圖 8 所示。

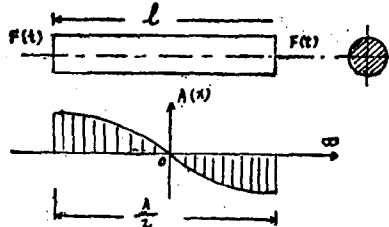


圖 8

圖 8 表示，振動振幅與沿
着桿軸離開中點距離的關係。
扭轉振動在桿內的諧振頻率較
低，振動的傳播速度較縱向振
動慢。它的基波與諧波頻率與桿長的关系式如下：

$$f_n = \frac{n \cdot v_{kp}}{2l} = n \cdot \frac{\sqrt{\frac{E}{\rho(2+2\sigma)}}}{2l} \cdot \frac{1}{2l}$$

$\sigma \dots$ 當桿受力時，桿的橫向壓力與縱向長度增量之比，一般金
屬 $\sigma \approx \frac{1}{3}$ 。

可以發現在上面公式中，振動元件的固有頻率與直徑 D_n 無
關。

實際上圓柱體的縱向振動與扭轉振動的固有頻率相同時，則兩
種振動是相伴而生的。

2. 金屬圓盤式的振動：它是利用金屬圓盤的彎曲振動。它的振
動可以有一個波節圓週或數個波節圓週，甚至还產生波節半徑的振
動。波節圓週的振動，中心點發生偏移，而波節半徑的振動，則圓
盤的中心點不動。

圖 9 表示一個波節圓週和兩個波節圓週的情形。

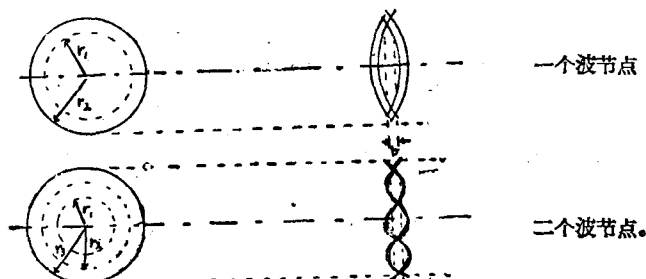


圖 9

对不同的波节数，其諧振頻率正比于 $(n+2h)^2$ ，式中 n ……节点直径数， h ……节点圆周数。实际上我們常利用 $n=0$ ， $h=2$ 的圆形金屬盤，它的固有頻率 f_b 与圓盤厚度 b ，半徑 r 及节点数 h 都有关，它們的比例关系表示在圖 10 曲線上。

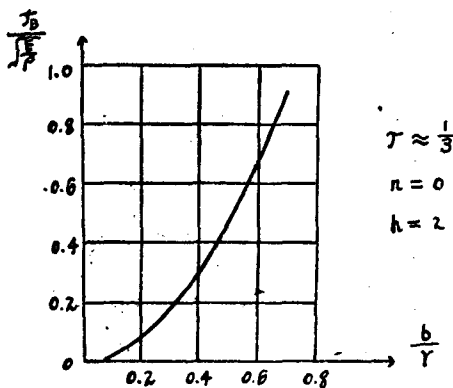


圖 10

屬板的縱向振動的傳播速度。上面所列举的几种振动形式都具有与机械振动波長可比拟的尺寸，因而諧振器可以按照具有分佈常数的力学長綫那样分析。

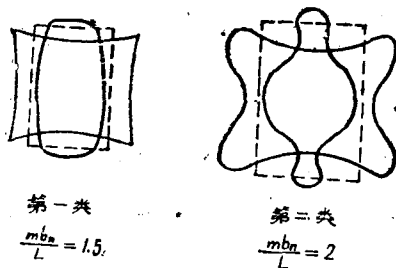


圖 11

m ……被激發的諧波次数。

3. 平板式綫耦合的振动元件：一般作拉伸振动，振动分第一类与第二类，振动如圖 11 所示。第一类振动应用于較低頻率，第二类振动应用于較高頻率，它的頻率与参数关系曲綫，示于圖 12 中，其中 $\sigma=0.31$ 。

曲綫中 $\sqrt{\frac{E}{\rho}}$ ……金

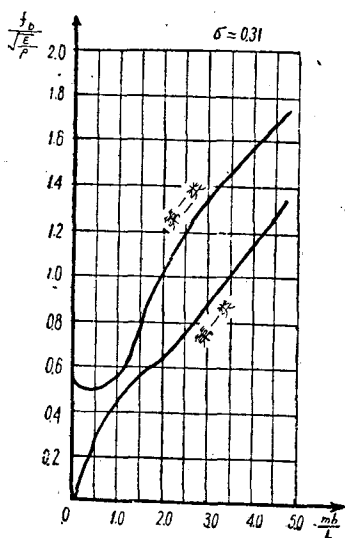


圖 12

第三章 机械滤波器的数学 分析和它的组成

当上章所述的各种形状的元件所引起的振动，服从于电的传输线同样的方程振动时，可以应用电的传输理论来推导（由前面机电类比的观念中，已知这是可能的）。

如图 13 所示的各种振动元件，可以用同一具有不均匀长线的情况来表示。

图 13 中，谐振器相当于具有输入阻抗 z_1 和电气长度 θ_1 ($\theta = \gamma l$)，而耦合器相当于具有输入阻抗 z_2 和电气长度 θ_2 ，这样就可以利用开路阻抗 z_∞ 和短路阻抗 z_0 的乘积，求出特性阻抗的平方。

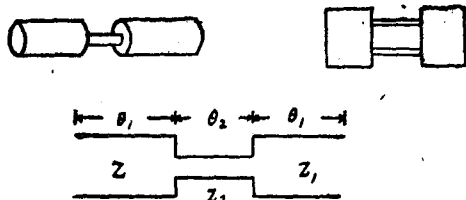


图 13

我们先看具有不均匀传输线的阻抗情况，图 14 表示具有两段不同阻抗值及参数的传输线。

下面来求它的特性阻抗。

$$\text{已知 } z'_0 = z'_0 \cdot z'_\infty, \quad \text{th } g = \frac{z'_0}{z'_\infty},$$

$$z'_0 = z_{c1} \cdot \text{th}(r_1 l_1 + \varepsilon_1)$$

$$\text{其中, } \text{th } \varepsilon_1 = \frac{z_{c2}}{z_{c1}} \text{th } r_2 l_2.$$

(当右端短路时,

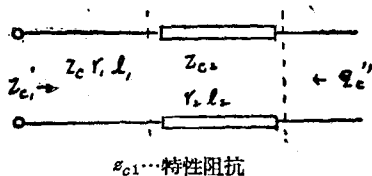


图 14

$$1-1 \text{ 点的输入阻抗为 } z_{bx1} = z_{c2} \text{th } r_2 l_2)$$

$$z'_\infty = z_{c1} \text{cth}(r_1 l_1 + \varepsilon'_1),$$

$$\text{其中, } \text{th } \varepsilon'_1 = \frac{z_{c1}}{z_{c2}} \cdot \text{th } r_2 l_2.$$

(当右端开路时,

1-1 点的輸入阻抗为 $z'_{b,1} = z_{c2} \cdot \text{cth } r_2 l_2$)

$$\begin{aligned} \therefore z_{c1}' &= z_{c1}^2 \cdot \frac{\text{th}(r_1 l_1 + \varepsilon_1)}{\text{th}(r_1 l_1 + \varepsilon_1')} \\ &= z_{c1}^2 \cdot \frac{\text{th } r_1 l_1 + \text{th } \varepsilon_1}{1 + \text{th } \varepsilon_1 \cdot \text{th } r_1 l_1} \cdot \frac{1 + \text{th } r_1 l_1 \cdot \text{th } \varepsilon_1'}{\text{th } r_1 l_1 + \text{th } \varepsilon_1'} \\ &= z_{c1}^2 \cdot \frac{\text{th } r_1 l_1 + \frac{z_{c2}}{z_{c1}} \text{th } r_2 l_2}{1 + \frac{z_{c2}}{z_{c1}} \cdot \text{th } r_2 l_2 \cdot \text{th } r_1 l_1} \cdot \frac{1 + \frac{z_{c1}}{z_{c2}} \text{th } r_2 l_2 \cdot \text{th } r_1 l_1}{\text{th } r_1 l_1 + \frac{z_{c1}}{z_{c2}} \cdot \text{th } r_2 l_2} \\ &= z_{c1}^2 \cdot \frac{\text{th } r_1 l_1 + \varphi \text{th } r_2 l_2}{\text{th } r_2 l_2 + \varphi \text{th } r_1 l_1} \cdot \frac{\varphi \text{cth } r_2 l_2 + \text{th } r_1 l_1}{\text{cth } r_2 l_2 + \varphi \text{th } r_1 l_1} \end{aligned}$$

上式中 $\varphi = \frac{z_2}{z_1} = \frac{z_{c2}}{z_{c1}}$.

如果令 $\theta_1 = r_1 l_1$, $\frac{\theta_2}{2} = r_2 l_2$, 并考虑到忽略其損耗,

即 rl 或者 θ 中沒有实数部份, 只有虚数部份, 則可得出

$$z_c^2 = z_1^2 \cdot \frac{(\tan \theta_1 + \varphi \tan \frac{1}{2} \theta_2)(\varphi \cot \frac{1}{2} \theta_2 - \tan \theta_1)}{(\tan \frac{1}{2} \theta_2 + \varphi \tan \theta_1)(\tan \frac{1}{2} \theta_2 + \varphi \tan \theta_1)}$$

当然把 φ 提出, 也可写成另一形式

$$z_c^2 = \frac{z_1^2}{\varphi^2} \cdot \frac{\tan^2 \theta_1 - 2\varphi \tan \theta_1 \cdot \text{cat } \theta_2 - \varphi^2}{\tan^2 \theta_1 - \frac{2}{\varphi} \tan \theta_1 \cdot \text{cat } \theta_2 - \frac{1}{\varphi^2}}$$

从上式可以看出, 由分子的一对根所决定的頻帶中, 阻抗在頻帶边缘处, 其值为零, 而在頻帶中間处, 有最大值, 在由分母的一对根所决定的頻帶中, 在頻帶边缘处阻抗出現 ∞ 值。前者相似于定 K 型濾波器中的 T 型阻抗特性, 而后者相似于 Π 型阻抗特性。

如果当 $\theta_1 = \theta_2$ 时, 其分子的根由 $\tan^2 \theta_1 = 2\varphi + \varphi^2$, 求出, 其分母的根由 $\tan^2 \theta_1 = \frac{2}{\varphi} + \frac{1}{\varphi^2}$ 求出。

它的阻抗特性可以用圖 15 表示。

对滿足上面方程式的各 θ 值之差, 就是此諧振器所組成的濾波器

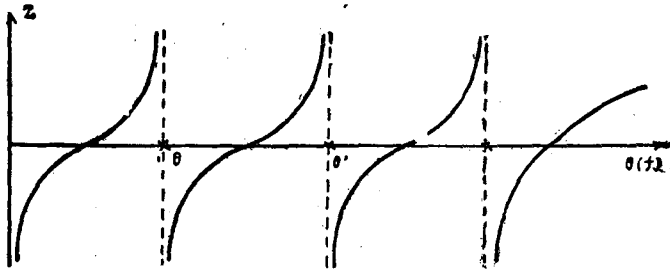


圖 15

的通頻帶。

設： $\theta_1 = \theta_2$ ，其根若由分子所決定，即由式

$$\tan^2 \theta = 2\varphi + \varphi^2 \text{ 所決定，且其桿長度為 } l = \frac{\lambda}{4},$$

$$\tan^*(\theta' - \theta'') = \frac{\tan \theta' - \tan \theta''}{1 + \tan \theta' \cdot \tan \theta''}$$

$$\tan(\theta' - \theta'') = \frac{\sqrt{2\varphi + \varphi^2} + \sqrt{2\varphi + \varphi^2}}{1 + (2\varphi + \varphi^2)}$$

$$= \frac{2}{\sqrt{\varphi^2 + 2\varphi}} \approx \frac{2}{\varphi} \left(1 - \frac{1}{\varphi}\right)$$

$$\text{而 } \Delta = \theta' - \theta'' \approx \frac{\tan(\theta' - \theta'')}{\frac{\pi}{2}}$$

$$\therefore \Delta \approx \frac{2}{\pi} \cdot \frac{2}{\varphi} \left(1 - \frac{1}{\varphi}\right),$$

其通頻帶的組成如圖 16。

則通帶的阻抗值如圖 17 所示，實際上 $R \neq 0$ ，所以不可能有 ∞ 值及 0 值。

如果 $\theta_2 = \frac{1}{2}\theta_1$ ，則用相同方法可得出

$$\Delta = \theta'_1 - \theta'_2 = \frac{2}{\pi} \varphi \left(1 - \frac{\varphi}{2}\right)$$

對 θ_2/θ_1 的其他比值，均可按此方法得到結果。上面我們推導了

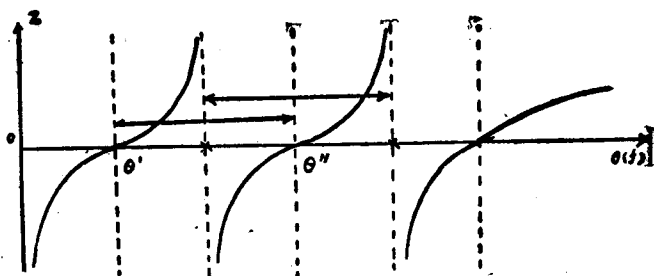


圖 16

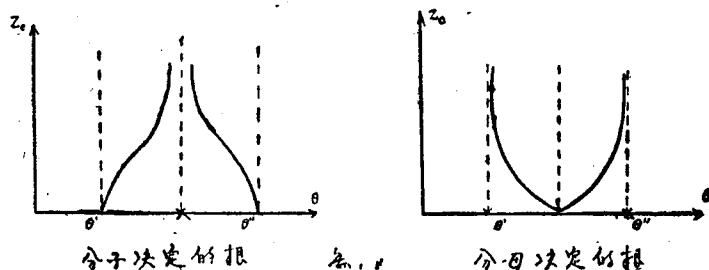


圖 17

机械濾波器在电气方面的阻抗特性以及組成通頻帶的情形。

在具体計算机械濾波器的尺寸时，可用下面一些关系确定。

1) 圆柱式：

$$f_{np} = \frac{\sqrt{\frac{E}{\rho}}}{\sqrt{2+2\sigma}} \cdot \frac{1}{2l}, \quad \sigma \approx \frac{1}{3}.$$

具有桿長為 $\frac{\lambda}{2}$ ，耦合頸長為 $\frac{\lambda}{4}$ 的頻帶寬度，可用下式确定：

$$\frac{\Delta f}{f_H} = \frac{3.9-4}{2\pi} \cdot \frac{z_2}{z_1}.$$

如果只有兩节，（相当于双諧振迴路）