

有源滤波器精确设计手册

〔美〕 D.E. 约翰逊 J.R. 约翰逊 H.P. 穆尔 著

李国荣 译 魏 津 校

電子工業出版社

内 容 简 介

本文详细阐述有源滤波器的一种最新设计方法。这种方法以模拟计算机为基础,采用高Q电路,多节级联,统一综合设计,具有指标高、精度好,性能稳定和切合实用等特点。全书共分七章:第一章介绍滤波器的基本概念,以及有源滤波器的使用元件和电路构成;第二章叙述巴特沃斯和切比雪夫型低通滤波器的设计方法;第三章叙述反切比雪夫和椭圆函数型低通滤波器的设计方法;第四章至第六章从上述低通原型出发,分别推导出各类型高通、带通和带阻滤波器的设计方法;第七章叙述全通和恒定延时滤波器的设计方法;最后,在附录中列出各类型滤波器的七位数字设计参数表。设计时根据通带频率,阻带频率,带内波动,阻带衰减技术要求,直接查表得出滤波器阶数和各节的设计数据,代入相应公式,算出元件精确数值,即可实现滤波器完整电路。

本书可供从事有源滤波器设计、生产或维护的工程技术人员阅读使用,也可供有关专业的高等院校和中等技校师生参考。

A HANDBOOK OF ACTIVE FILTERS

D.E. JOHNSON, J.R. JOHNSON, and H.P. MOORE

New Jersey 1980

有源滤波器精确设计手册

(美) D.E. 约翰逊 J.R. 约翰逊 H.P. 穆尔 著

李国荣 译 魏 津 校

责任编辑 王昌喜

*

电子工业出版社出版(北京市万寿路)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

山东电子工业印刷厂印刷

*

1984年3月第1版 开本: 787×1092 1/32

1984年5月第1次印刷 印 张: 10,125

印数: 12,000 册 字数: 235,872千字

统一书号: 15290·22

定价: 1.50元

目 录

前 言

第一章 绪 论

§ 1-1 选频滤波器	1
§ 1-2 其他类型滤波器	3
§ 1-3 传递函数	4
§ 1-4 有源滤波器的元件	5
§ 1-5 滤波器的结构	7

第二章 巴特沃斯和切比雪夫型低通滤波器

§ 2-1 低通滤波器概述	9
§ 2-2 巴特沃斯滤波器	12
§ 2-3 切比雪夫滤波器	15
§ 2-4 最低阶数的选取	19
§ 2-5 无限增益多端反馈低通滤波器	21
§ 2-6 VCVS (压控电压源) 低通滤波器	26
§ 2-7 双二次型低通滤波器	28
§ 2-8 二阶滤波器的调整	29
§ 2-9 奇数阶滤波器	32
§ 2-10 MFB (多端反馈) 低通滤波器设计概要	33
§ 2-11 VCVS 低通滤波器设计概要	35
§ 2-12 双二次型低通滤波器设计概要	37
§ 2-13 奇数阶低通滤波器设计概要	39

第三章 反切比雪夫和椭圆函数型低通滤波器

§ 3-1 反切比雪夫滤波器	41
§ 3-2 椭圆函数滤波器	46
§ 3-3 VCVS 椭圆函数滤波器	50
§ 3-4 三电容椭圆函数滤波器	55
§ 3-5 双二次型椭圆函数滤波器	58
§ 3-6 反切比雪夫和椭圆函数滤波器的调整	60
§ 3-7 奇数阶椭圆函数滤波器	62
§ 3-8 VCVS 椭圆函数低通滤波器设计概要	62
§ 3-9 三电容椭圆函数低通滤波器设计概要	65
§ 3-10 双二次型椭圆函数低通滤波器设计概要	66
§ 3-11 奇数阶椭圆函数低通滤波器设计概要	68

第四章 高通滤波器

§ 4-1 概述	71
§ 4-2 无限增益多端反馈高通滤波器	74
§ 4-3 VCVS 高通滤波器	76
§ 4-4 双二次型高通滤波器	77
§ 4-5 反切比雪夫和椭圆函数高通滤波器	78
§ 4-6 二阶滤波器的调整	79
§ 4-7 奇数阶高通滤波器	81
§ 4-8 MFB 高通滤波器设计概要	82
§ 4-9 VCVS 高通滤波器设计概要	84
§ 4-10 双二次型高通滤波器设计概要	85
§ 4-11 VCVS 椭圆函数高通滤波器设计概要	87
§ 4-12 三电容椭圆函数高通滤波器设计概要	89

§ 4-13 双二次型椭圆函数高通滤波器设计概要	91
§ 4-14 奇数阶椭圆函数高通滤波器设计概要	93

第五章 带通滤波器

§ 5-1 概述	95
§ 5-2 传递函数	98
§ 5-3 过渡带宽	104
§ 5-4 无限增益多端反馈带通滤波器	106
§ 5-5 VCVS带通滤波器	108
§ 5-6 双二次型带通滤波器	109
§ 5-7 反切比雪夫和椭圆函数带通滤波器	111
§ 5-8 二阶带通滤波节的调整	111
§ 5-9 带通滤波器结构设计的一般知识	113
§ 5-10 MFB 带通滤波器设计概要	115
§ 5-11 VCVS带通滤波器设计概要	118
§ 5-12 双二次型带通滤波器设计概要	121
§ 5-13 VCVS椭圆函数带通滤波器设计概要	124
§ 5-14 三电容椭圆函数带通滤波器设计概要	128
§ 5-15 双二次型椭圆函数带通滤波器设计概要	131

第六章 带阻滤波器

§ 6-1 概述	135
§ 6-2 传递函数	137
§ 6-3 过渡带宽	141
§ 6-4 无限增益多端反馈带阻滤波器	143
§ 6-5 VCVS带阻滤波器	145
§ 6-6 二阶带阻滤波节的调整	146

§ 6-7	带阻滤波器结构设计的一般知识	148
§ 6-8	MFB 带阻滤波器设计概要	149
§ 6-9	VCVS 带阻滤波器设计概要	151
§ 6-10	VCVS 椭圆函数带阻滤波器设计概要	153
§ 6-11	三电容椭圆函数带阻滤波器设计概要	157
§ 6-12	双二次型椭圆函数带阻滤波器设计概要	161

第七章 全通和恒定延时滤波器

§ 7-1	全通滤波器	166
§ 7-2	多端反馈全通滤波器	168
§ 7-3	双二次型全通滤波器	171
§ 7-4	贝塞尔滤波器	173
§ 7-5	全通恒定延时滤波器	176
§ 7-6	MFB 全通滤波器设计概要	178
§ 7-7	双二次型全通滤波器设计概要	181
§ 7-8	贝塞尔(恒定延时)滤波器设计概要	183
§ 7-9	全通恒定延时滤波器设计概要	184

附 录

附录 I	巴特沃斯和切比雪夫低通滤波器设计数据表	188
附录 II	反切比雪夫低通滤波器设计数据表	194
附录 III	椭圆函数低通滤波器设计数据表	215
附录 IV	椭圆函数滤波器过渡带宽	306
附录 V	贝塞尔低通滤波器设计数据表	310

参考文献

第一章 绪 论

§ 1-1 选频滤波器

通常,电气滤波器是一个频率选择部件。它可以通过某些频率的信号而抑制或衰减另外一些频率的信号。选频滤波器一般分为低通(通过低频而抑制高频)、高通(通过高频而抑制低频)、带通(通过某一频带而抑制高于和低于这一频带的信号)和带阻(抑制某一频带而通过高于和低于这一频带的信号)四种。

一个滤波器的性能可以用它的传递函数 $H(s)$ 正确的表达。我们写成

$$H(s) = \frac{V_2(s)}{V_1(s)} \quad (1-1)$$

式中 V_1 和 V_2 分别为输入电压和输出电压,示如图1-1。复频率(或称广义频率) $s = j\omega$ ($j = \sqrt{-1}$), 传递函数也可以写成

$$H(j\omega) = |H(j\omega)| e^{j\phi(\omega)} \quad (1-2)$$

这里 $|H(j\omega)|$ 是幅度, $\phi(\omega)$ 是相角, 而 ω (以 rad/s, 即弧度/秒为单位) 和频率 f (以 Hz, 即赫芝为单位) 的关系为 $\omega = 2\pi f$ 。

通过的频率范围(频带)称为通带, 通带内输出信号的幅度比较大, 在理想情况下为一恒定的

数值。抑制的频率范围称为阻带, 阻带内输出信号的幅度比

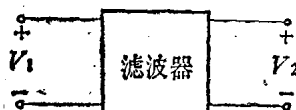


图 1-1 电气滤波器表示法

较小，在理想情况下为零。如图 1-2，虚线表示一个理想低通滤波器的幅频响应特性，它的通带为 $0 < \omega < \omega_c$ ，而阻带为 $\omega > \omega_c$ ，作为通带与阻带分界点的频率 f_c (Hz, $f_c = \omega_c / 2\pi$)，称为截止频率，简称“截频”。

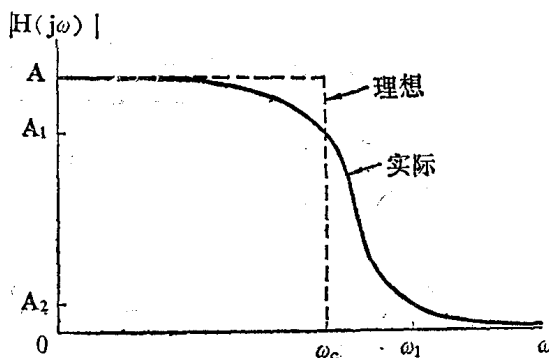


图 1-2 理想的和实际的低通滤波器幅频特性示意图

由于理想的响应曲线要求拐角为直角，这实际上是不可能达到的。因此，滤波器设计的中心问题，就是要计算出一个响应曲线按照规定精确度逼近理想情况的滤波器，并在实验室中制作实现。图 1-2 用实线表示的就是这样一条低通滤波器的实际响应曲线。

在实际响应曲线上，滤波器通带和阻带的界限不是截然划分的。这就需要给通带和阻带下一个明确的定义。我们定义：对于单位输入信号，输出幅度大于某一规定值（如图 1-2 的 A_1 ）的频率范围为通带，而输出幅度小于某一规定值（如图 1-2 的 A_2 ）的频率范围为阻带。从通带到阻带输出幅度逐渐减小的这个频率区间称为过渡带。在图 1-2 实例中，通带为 $0 < \omega < \omega_c$ ，阻带为 $\omega > \omega_1$ ，而过渡带则为 $\omega_c < \omega < \omega_1$ 。

相对幅度亦可用 dB（分贝）表示。定义

$$\alpha = -20 \log_{10} |H(j\omega)| \text{ dB} \quad (1-3)$$

这个数亦称衰减。例如,假定图1-2中 $A = 1$, 对应 $\alpha = 0\text{dB}$ 。如果 $A_1 = A/\sqrt{2} = 1/\sqrt{2}$, 则 ω_c 上的衰减为

$$\alpha_1 = -20\log_{10}(1/\sqrt{2}) = 3\text{dB}$$

通常通带内的相对幅度衰减都不超过 3dB; 故从上例可见通带幅度不小于最大输出幅度的 $1/\sqrt{2} = 0.707$ 或 70.7%。或者说, 通带内的幅度比其最大值下降不超过 3dB。

对于选频滤波器来说, 某一频率信号是通过还是被抑制是由它的输出幅度来判定的, 所以幅频特性是主要特性。本书的内容主要是讨论选频滤波器, 但也用了一定的篇幅讨论另外两种滤波器—全通滤波器和恒定延时滤波器。下节我们将简要讨论传递函数中除了幅度特性以外的另一些特性, 这些特性对于全通和恒定延时滤波器来说是十分重要的。

§ 1-2 其他类型滤波器

除了选频滤波器之外, 还有以(1-2)式相位响应 $\phi(\omega)$ 为主要特性的其他一些滤波器, 如全通滤波器。它的输出幅度在全频域内是恒定不变的(即所有频率信号都通过得一样好), 但输出信号对输入信号的相移值却是频率的函数。因此全通滤波器也称为相移滤波器。

通常, 滤波器中, 尽管相位特性不是主要的, 但却是重要的特性。因为只有输出电压的幅度特性和延时特性都符合一定的规律, 滤波器的输出信号才是输入信号的不失真复制品。这时要求信号幅度恒定, 并且相位与频率成线性关系, 即

$$\phi(\omega) = -\tau\omega \quad (1-4)$$

其中 τ 为一常数(可参看参考文献[32, 33, 5和16]*。相位

* 参考文献按序号次序在书末列出。引用时用方括号标明, 其中数字即文献序号。

特性的非线性越严重，输出信号失真就越厉害。遗憾的是如果企图改善滤波器的幅度特性使之更加逼近理想情况，则其相位特性就会变坏；反之亦然。因此，设计滤波器时要兼顾幅度特性和相位特性两个方面，都要得到满意的结果。

滤波器的延时 $T(\omega)$ 定义为相位-频率特性曲线的负斜率。它等于

$$T(\omega) = -\frac{d}{d\omega}\phi(\omega) \quad (1-5)$$

若相位特性呈线性，参看(1-4)式我们得到 $T(\omega) = \tau$ ，为一常数。在延时滤波器中，时间延迟是最主要的特性，必须设计成在一个规定的频率范围内 $T(\omega)$ 十分接近于常数。

在任何场合下，我们都要注意相位特性和延时特性，在本节所述两种滤波器中尤为重要。输出信号的失真直接与相位有关，而相位与延时又有着极为密切的关系。

§ 1-3 传递函数

如前所述，理想的滤波器是不可能实现的。但是，用电路元件可以制作出接近理想特性的实用滤波器。它的传递函数可以表示成两个多项式的比。为了便于应用，我们令

$$H(s) = \frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{a_m s^m + a_{m-1} s^{m-1} + \dots + a_1 s + a_0}{b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_1 s + b_0} \quad (1-6)$$

其中 a, b 为实常数，以及

$$m, n = 1, 2, 3, \dots (m \leq n) \quad (1-7)$$

分母多项式的幂次 n 即为滤波器的阶数。以后要讲到，高

阶滤波器的幅度特性优于低阶滤波器,即更加接近理想情况。但高阶滤波器电路复杂,造价较高。滤波器设计的要旨就是以最低的代价实现符合要求的特性。

若(1-6)式除 a_0 外所有分子项系数 a 均为零,则传递函数变成一常数与多项式之比。这时,传递函数只存在有限极点而不存在有限零点,所以这种滤波器称为全极点滤波器。(零点指传递函数为零时的一个 s 值,极点指传递函数为无穷大时的一个 s 值。)

下面我们将讨论各种类型滤波器的简捷设计方法。讨论时从全极点出发,再引伸到一般化的传递函数。

§ 1-4 有源滤波器的元件

当得出适用的传递函数之后,可以用各种各样的电路来实现滤波器。概括起来,分为无源电路和有源电路两大类。

无源滤波器由电阻、电感和电容构成,这些都属于无源元件。无源滤波器在某些频率范围是适用的,但是在低频段,比如说频率低于0.5MHz时就不适用了。这是因为低频运用所需的电感元件体积过大,不易达到理想的性能,而且不能象电阻、电容那样适应集成化技术。

因此在低频应用中总是希望去掉电感元件,采用有源滤波器便可以达到这个目的(参

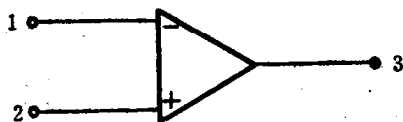


图 1-3 运算放大器电路符号

看〔28、21、22、13、14〕)。有源滤波器由电阻、电容、有源器件,以及相应的独立电源等构成。一种常用的有源器件就是集成电路运算放大器,简称“运放”(op amp)〔12、17、4、9、16、6〕,后面我们将只使用这种有源器件。其电路符号

示如图 1-3。

运放是一种多接头器件，但可简化剩下三个接头。如图 1-3，“1”为反相输入端，“2”为同相输入端，“3”为输出端。作为理想情况，运放的输入阻抗为无限大，输出阻抗为零，增益亦为无限大。故分析电路时可假定运放两个输入端之间的偏置电压以及流进两输入端的电流均为零。实际上运算放大器在一个有限的频率范围内非常接近理想情况，这个有限的频率范围因运放的不同型号而异。

图 1-3 未画出电源供给接头；有些运放（如 709 型）还有外补偿接头，另外一类运放（如 741 型）则没有外补偿接头。这些附加接头的使用方法由生产厂家的技术说明书提供。通常在高频运用中，有外部补偿的运放比没有外补偿接头的内部补偿运放具有比较好的使用效果。

在制作有源滤波器时，设计者要使用满足特定增益要求和频率范围的运算放大器。比如运放的开环增益最小应为滤波器增益的 50 倍（后面我们将给“滤波器增益”一词下定义，对于不同类型的滤波器，其概念不尽相同）。

为了达到最佳运用，还要考虑运放的“上升速率”，通常以每微秒伏 ($v/\mu s$) 为单位给出，它表述运放在给定频率中所能提供的输出电压振幅极限值。频率越高，输出电压振幅越大，要求运放的上升速率越快。上升速率的典型数值由 0.5 到数百 $v/\mu s$ ；然而用于某些特殊场合的运算放大器，其上升速率可达数千 $v/\mu s$ 。

运放的开环增益、上升速率等数据以及接头连接方法，都在生产厂家的产品目录中详细列出。此外还有许多书刊深入阐述运放的各种特性〔9、20、10〕。

最通用的廉价碳质电阻器可以用来制作非精密滤波器。

如四阶以下的滤波器，在室温环境下使用时，公差为 5 % 的碳质电阻已敷应用。至于高性能滤波器，可使用诸如金属膜电阻或线绕电阻等高质量电阻器。滤波器的阶数越高，要求元件越精确。高于四阶的滤波器，应使用公差为 2 % 以下的电阻构成。

最常用的电容器是聚脂薄膜电容器，这在大多数滤波器的制作中都能应用。聚苯乙烯和聚四氟乙烯电容器质量更佳，但比较昂贵，宜用于高性能滤波器。普通的廉价陶瓷圆片电容器只能在极不精密的滤波器中使用。

§ 1-5 滤波器的结构

给定了 n 阶传递函数，可以用若干种方法进行滤波器电路计算。一种常用的方法是把传递函数分解为 $H_1, H_2, \dots, H_m$ 诸因式的乘积，对应于每一因式构成一滤波节，或称一级滤波器电路，相应为 $N_1, N_2, \dots, N_m$ 。最后把各节电路如图 1-4 所示级联起来。（第一节输出连接第二节输入，依此类推）。如果分别变化每节的传递函数而彼此不存在相互影响，则级联后即可获得原来的 n 阶传递函数。前面已经提到，运放具有无穷大的输入阻抗和零输出阻抗，所以各节之间互不影响的要求是不难满足的。

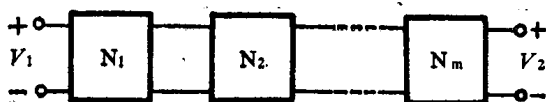


图 1-4 滤波节的级联

对于一阶滤波器，传递函数为

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{P(s)}{s + C} \quad (1-8)$$

其中 C 为常数, $P(s)$ 为一次或零次多项式。

二阶滤波器的传递函数为

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{P(s)}{s^2 + Bs + C} \quad (1-9)$$

其中 B 和 C 为常数, $P(s)$ 为幂次不高于 2 的多项式。

对于 $n > 2$ 的情况: 若 n 为偶数, 常用 $n/2$ 节二阶电路级联构成, 每节的传递函数如 (1-9) 通式; 若 n 为奇数, 则整个滤波器由 $(n-1)/2$ 节二阶电路与一节一阶电路级联构成, 其中各二阶电路节的传递函数如 (1-9) 通式, 而一阶电路节的传递函数如 (1-8) 通式。

在 (1-9) 式中, 我们定义极偶频率 (pole-pair frequency) 为

$$\omega_p = \sqrt{C} \quad (1-10)$$

以及极偶品质因数 (pole-pair quality) 为

$$Q_p = \frac{\sqrt{C}}{B} \quad (1-11)$$

这样 (1-9) 式可以写成

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{P(s)}{s^2 + (\omega_p/Q_p)s + \omega_p^2} \quad (1-12)$$

以后还要谈到, 若 Q_p 较低, 比如说在 0 到 5 之间, 比较简单的电路即可获得 (1-9) 式的传递函数; 但如果 Q_p 较高, 比如说大于 10, 则需要使用比较复杂的电路。

第二章 巴特沃斯和切比雪夫型 低通滤波器

§ 2-1 低通滤波器概述

低通滤波器通过低频信号，抑制高频信号。通常，我们称 $0 < \omega < \omega_c$ 区间为通带， $\omega > \omega_1$ 区间为阻带，而 $\omega_c < \omega < \omega_1$ 为过渡带。当然， ω_c 即为截止频率。图2-1为一个低通滤波器的幅频特性曲线，两个暗影区域分别表示通带和阻带内给定的容许幅度波动范围。

如果我们规定以通带内最小衰减为 0dB 对应图 2-1 中 $A = 1$ ），低通衰减按 dB 数画出曲线如图 2-2。通带

内最大衰减为 α_1 dB，阻带内最小衰减为 α_2 dB（分别对应于幅度 A_1 和 A_2 ）。衰减 α_1 一般不超过 3dB， α_2 的典型数值却相当大，比如在 $20 \leq \alpha_2 \leq 100$ dB 范围之内（此时我们得到 $0.1 \geq A_2 \geq 0.00001$ ）。

低通滤波器的增益即为其传递函数在 $s=0$ 处的函数值。或者说相当于 $\omega=0$ 时单位输入电压所得到的输出电压

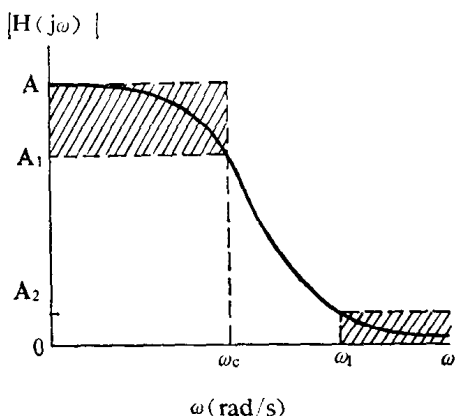


图 2-1 低通滤波器的典型幅频特性

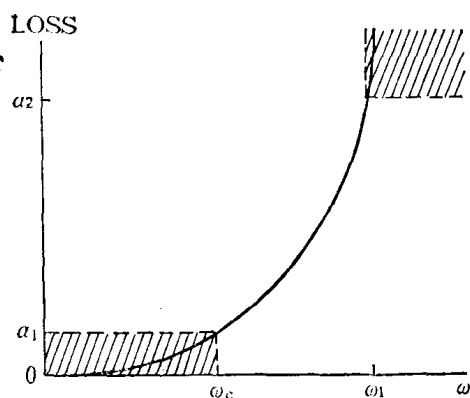


图 2-2 用dB值表示的低通衰减

值。因此，实用滤波器的增益若以幅度表示，即为图2-1的 A 值。

给定图 2-1 的 A 、 A_1 、 A_2 、 ω_c 和 ω_1 ，或者给定图2-2的 α_1 、 α_2 、 ω_c 和 ω_1 等项技术指标，可以设计出若干种型式低通滤波器。

最常用的有巴特沃斯、切比雪夫、反切比雪夫和椭圆函数四种型式。巴特沃斯滤波器具有如图2-1或图2-2那样的单调变化幅频特性曲线(输出幅度随频率增高而单调减小)。切比雪夫幅频特性在通带内是波动的，但在阻带内单调变化。图2-3绘出一个六阶切比雪夫滤波器的幅频特性曲线。反切比雪夫幅频特性与切比雪夫相反，即在通带内呈单调减小而在阻带内产生波动。图2-4为一个六阶反切比雪夫低通滤波器的幅频特性曲线。最后，椭圆函数滤波器的幅频特性在通带内和阻带内都是波动的。图2-5即为六阶椭圆函数滤波器的幅频特性曲线。

最佳的低通滤波器在给定阶数 n 和容许的通带、阻带波动指标下，幅度特性满足图2-1(或图2-2)要求，并且具有最窄的过渡带。也就是说，若给定 A 、 A_1 、 A_2 、 n 和 ω_c ，要求得出最小的 ω_1 。在全极点滤波器中，最佳滤波器为切比雪夫型。但总的来说，则以椭圆函数滤波器为最佳，并且大大优于切比雪夫滤波器。

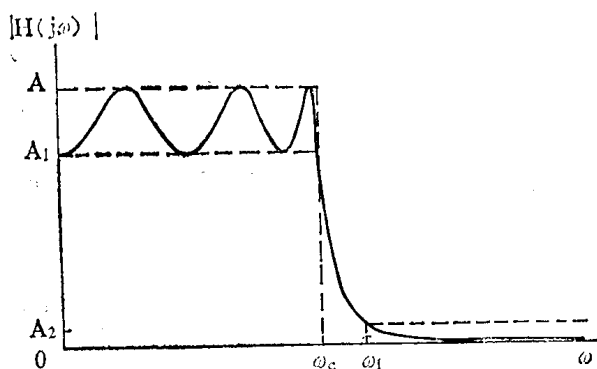


图 2-3 六阶切比雪夫幅频特性

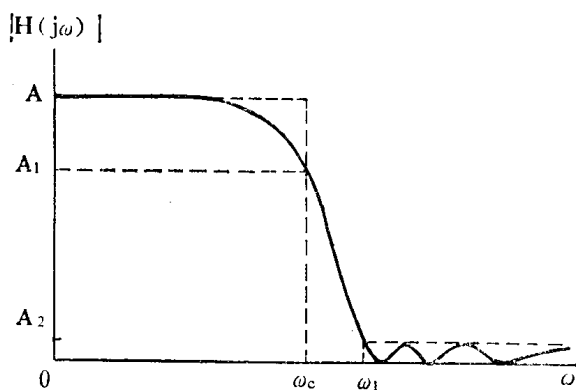


图 2-4 六阶反切比雪夫幅频特性

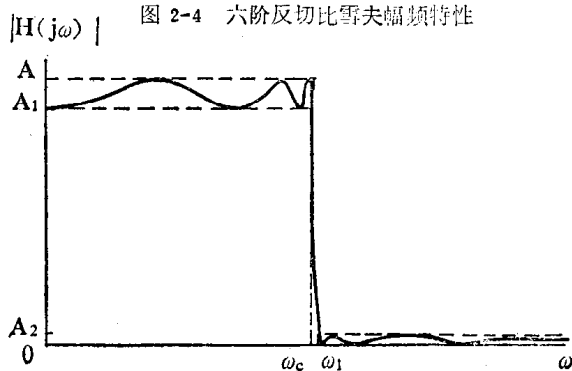


图 2-5 六阶椭圆函数幅频特性