

石英谐振器的设计 和制造

国防工业出版社

石英谐振器的设计和制造

山东大学物理系

编著

北川无线电器材厂

国防工业出版社

内 容 简 介

本书较系统地介绍了石英谐振器的设计方法及制造工艺。全书分七章。第一章着重从石英晶体的物理性质来讨论切型的选择问题；第二章至第五章介绍伸缩、弯曲、面切变和厚度切变等四种振动模式石英谐振器的性能和设计方法，并有设计举例；最后两章扼要地介绍了石英谐振器的制造工艺。

本书可供从事压电石英技术工作者阅读，也可供有关科技人员和大专院校师生参考。

石英谐振器的设计和制造

山东大学物理系 编著
北川无线电器材厂

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

787×1092¹/₃₂ 印张 6-1/8 128千字

1979年9月第一版 1979年9月第一次印刷 印数 0,001—5,400册

统一书号：15034·1849 定价：0.66元

前 言

在毛主席“独立自主，自力更生”的伟大方针指引下，我国压电石英谐振器的科研和生产从无到有，并取得了很大成就。现在压电石英谐振器已广泛地应用于通讯、导航、频率标准、自动控制、彩色电视和电子手表等各个方面，并成为精密仪器中的重要元件之一。为了加速我国压电石英技术的发展，赶超世界先进水平，满足从事压电石英谐振器的设计、生产、科研和使用等广大技术人员的需要，我们编写了此书。

书中主要突出了石英谐振器的性能和设计方法的介绍。在选材方面，以总结我国的设计实践经验为主，同时也选取了部分国外有关的资料。

本书在编写过程中，得到许多兄弟单位的热情支持和帮助，对此深表谢意。由于我们水平有限，书中难免会存在某些缺点和错误，希望广大读者批评指正。

编 者

目 录

绪论	1
第一章 石英晶体切型的选择	3
§ 1-1 石英晶体的振动模式	3
§ 1-2 石英晶体的切角与弹性常数	7
§ 1-3 石英晶体的切角与压电常数	16
§ 1-4 石英晶体的切角与频率温度特性	20
§ 1-5 石英晶体四种振动模式的零温度系数计算	24
§ 1-6 石英晶体切型的选择	29
第二章 伸缩振动石英谐振器的设计	35
§ 2-1 石英谐振器的频率常数和频率温度系数	35
§ 2-2 伸缩振动石英谐振器的等效参数	41
§ 2-3 伸缩振动的其它切型	45
§ 2-4 伸缩振动石英谐振器的设计	49
第三章 弯曲振动石英谐振器的设计	54
§ 3-1 厚度弯曲石英谐振器的电极、频率常数和频率温度特性	54
§ 3-2 面弯曲石英谐振器的电极、频率常数和频率温度特性	62
§ 3-3 弯曲振动石英谐振器的等效参数	65
§ 3-4 弯曲振动石英谐振器的设计	68
§ 3-5 手表石英谐振器	71
第四章 面切变石英谐振器的设计	77
§ 4-1 面切变石英谐振器的频率常数和频率温度特性	78
§ 4-2 面切变石英谐振器的等效参数	84
§ 4-3 x -宽度 DT 切型石英谐振器	88
§ 4-4 面切变石英谐振器的设计	91
第五章 厚度切变石英谐振器的设计	98
§ 5-1 AT 切型石英谐振器的频率方程和频率常数	99

§ 5-2	AT 切型石英谐振器的频率温度特性	104
§ 5-3	AT 切型石英谐振器的等效参数	111
§ 5-4	AT 切型圆片石英谐振器的设计	115
§ 5-5	AT 切型矩形片的设计	125
§ 5-6	BT 切型石英谐振器	132
§ 5-7	高精密石英谐振器	135
§ 5-8	厚度切变石英谐振器的其它应用	145
第六章	石英谐振器的半成品加工	149
§ 6-1	石英晶体的定向	149
§ 6-2	常用切型的划线	154
§ 6-3	X 光测角	160
§ 6-4	复杂情况的测角计算	166
§ 6-5	切割与研磨	172
第七章	石英谐振器的装配和测试	175
§ 7-1	清洗腐蚀	175
§ 7-2	被电极	176
§ 7-3	调频	180
§ 7-4	装架	182
§ 7-5	封装	185
§ 7-6	石英谐振器的参数测试	186

绪 论

自 1880 年发现石英晶体的压电效应到现在已将近一个世纪了，用石英谐振器作为频率控制和频率标准也有五十多年的历史。特别是近二十年来，压电石英技术有很大的发展，品种增多了，性能提高了，理论研究也大大地加强了。人造石英晶体的发展，使石英谐振器的产量有更大幅度的增长。目前，石英谐振器不但在军用通讯装置和科研仪器设备中占有重要的地位，而且在民用方面也发展很快，电子手表中的石英谐振器就是其中之一。

早期采用的石英晶片都是形状简单、加工容易的切型，例如 $x0^\circ$ 和 $y0^\circ$ 切型。这些切型的频率温度特性和单频性都比较差。后来相继发现了频率温度特性和单频性都好的各种切型。例如， $x+5^\circ$ 、 $x-18^\circ30'$ 、AT、BT、CT、DT、ET、FT、GT、HT 等单转角切型，以及 MT、NT 等双转角切型。这些切型的发现使石英谐振器的频率范围得到扩展，性能也显著提高。特别是近年来，为了满足各种特殊需要，又发现了许多性能优良的高频双转角切型。例如，RT、FC、SC、TTC 以及 LC 切型。除了对晶片的切型作了大量的研究外，为了改善性能还对晶片外形作了大量的工作。例如，从正方形、矩形等较简单的几何形状，发展到今天的平凸、双凸、斜菱形、音叉型等较复杂的样式。石英谐振器的外壳也由质量较差的胶木盒发展到质量较好的玻壳、金属壳等组

装结构。

要制造一个性能优良的石英谐振器，首先要有完善的设计，而谐振器的技术指标则是设计的依据。通常谐振器的技术指标主要包括标称频率、工作温度范围、频率偏移、等效参数（如动态电阻 R_1 或品质因数 Q 、静电容 C_0 、动态电感 L_1 和动态电容 C_1 等）、老化率、石英谐振器的最大允许尺寸、环境条件等等。

设计的第一步是选择石英晶片的切型。选用那一种切型是根据技术指标中的标称频率、频率温度特性和等效参数等来确定的；第二，因为切角的变化对频率温度特性的影响很大，所以切型选定后，就要根据技术指标中的频率偏移来精确地选定切角的数值；第三，在选定切角后，晶片的形状和尺寸就是决定频率的主要因素，而且还要影响频率温度特性和等效参数。设计晶片的形状和尺寸时就应考虑这些因素。最后，再根据振动模式等条件设计晶片的电极、支架结构和封装形式。

有了正确的设计，还要有完善的加工工艺。例如，石英谐振器的 Q 值、单频性和老化率等在很大程度上是由晶片表面光洁度、平行度，以及几何形状的正确与否来确定的。装架工艺对晶片的频率温度特性也有影响。因此，本书最后两章对晶片的加工、晶体谐振器的装架和封装等工艺也作了简单的介绍。

第一章 石英晶体切型的选择

压电石英晶体谐振器简称为石英谐振器。它由石英晶片、电极、支架和外壳等部分组成。它的性能与晶片的切型和尺寸、电极的设置、装架形式，以及加工工艺等有关。其中，晶片的切型问题是设计时首先要考虑的关键问题。由于石英晶体不是在任何方向都具有压电效应，也不是从石英晶体上任意切下一块晶片，就具有单一的振动模式（即单频性）和零温度系数，因此只有沿某些方向切下来的晶片才能满足设计要求。本章从石英晶体的弹性性质、压电性质和温度性质等三个方面来讨论晶体切型的选择问题。

§ 1-1 石英晶体的振动模式

按照不同的使用要求，石英谐振器的标称频率从几千赫到几百兆赫。这样宽的频率范围是通过采用不同的振动模式和不同的晶片尺寸来实现的。石英谐振器的振动模式有长度伸缩振动模式、弯曲振动模式、面切变振动模式和厚度切变振动模式等四种，如图 1-1-1 所示。

一、长度伸缩振动模式

当晶片的长度远大于宽度和厚度时，长度伸缩振动模式的频率方程为

$$f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{1}{\rho s_{tt}}} \quad (1.1.1)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

频率常数为

$$K_{fn} = \frac{n}{2} \sqrt{\frac{1}{\rho s_{ii}}} \quad (1.1.2)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

式中 n —— 泛音次数;

f_n —— 第 n 次泛音频率;

l —— 沿 i 方向的长度 ($i = 1, 2, 3$ 时, 分别表示沿 x, y, z 方向);

ρ —— 石英晶体的密度;

s_{ii} —— 沿 i 方向的弹性柔顺常数。

二、弯曲振动模式

当晶片的长度远大于宽度和厚度时, 弯曲振动模式的频率方程为

$$f_n = \frac{m_n^2 a}{2 \pi \sqrt{12} l^2} \sqrt{\frac{1}{\rho s_{ii}}} \quad (1.1.3)$$

频率常数为

$$K_{fn} = \frac{m_n^2}{2 \pi \sqrt{12} l^2} \sqrt{\frac{1}{\rho s_{ii}}} \quad (1.1.4)$$

式中 a —— 晶片宽度 w 或厚度 t ;

m_n —— 与泛音次数 n 有关的常数。

当 $a = w$ 时, 称为宽度弯曲(或面弯曲)振动; 当 $a = t$ 时, 称为厚度弯曲振动。当晶片两端自由时, m_n 的数值

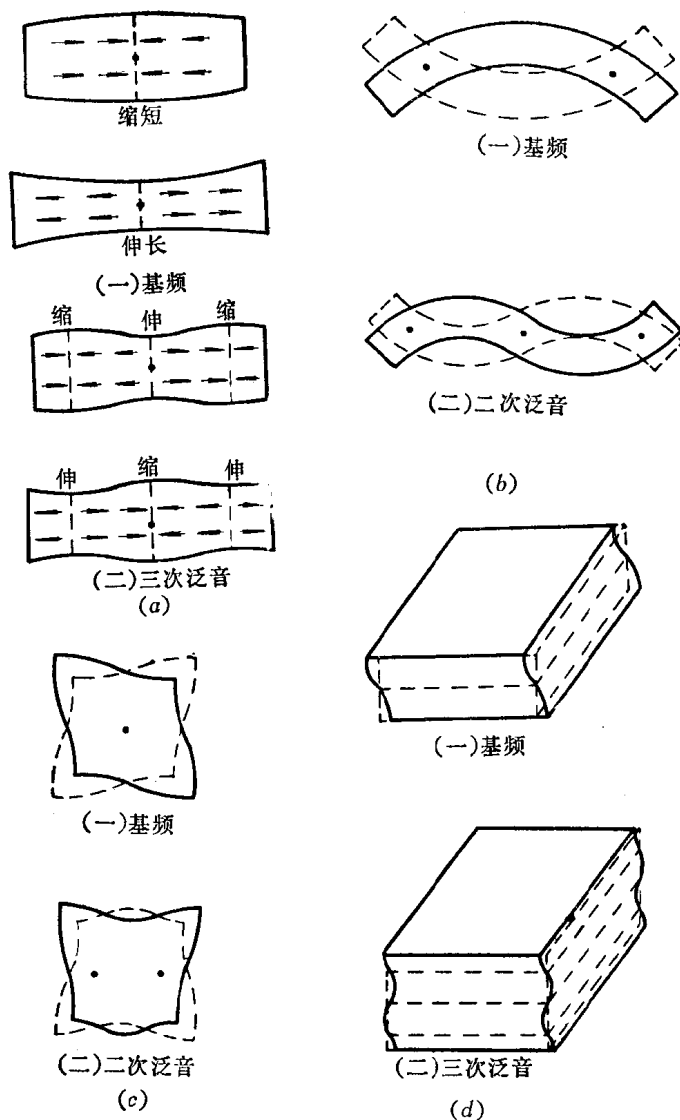


图1-1-1 石英晶体的振动模式

(a) 长度伸缩振动模式； (b) 弯曲振动模式；
(c) 面切变振动模式； (d) 厚度切变振动模式。

为: 基频 $m_1=4.73$; 二次泛音 $m_2=7.853$; 三次泛音 $m_3=10.996$; 三次泛音以上 $m_n=\left(\frac{2n+1}{2}\right)\pi$, 其中 $n=4, 5, 6, \dots$ 。当晶片一端固定一端自由时, m_n 的数值为: 基频 $m_1=1.8751$; 二次泛音 $m_2=4.6941$; 三次泛音 $m_3=7.8548$ 。

三、面切变振动模式

当晶片的厚度远小于长度和宽度时, 面切变振动模式的频率方程为

$$f_{mn} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{\rho s_{ii}}} \sqrt{\frac{m^2}{l^2} + k^2 \frac{n^2}{w^2}} \quad (1.1.5)$$

$$m, n = 1, 2, 3, \dots$$

频率常数为

$$K_{f_{mn}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{\rho s_{ii}}} \sqrt{m^2 + k^2 \left(\frac{w}{l}\right)^2} \quad (1.1.6)$$

$$m, n = 1, 2, 3, \dots$$

式中 l —— 晶片长度;

w —— 晶片宽度;

m —— 与长度有关的泛音次数;

n —— 与宽度有关的泛音次数;

s_{ii} —— 切变弹性柔顺常数 ($i = 4, 5, 6$ 时, 分别表示 x 面, y 面, z 面);

k —— 由实验确定的修正系数。

四、厚度切变振动模式

当晶片的厚度远小于长度和宽度时, 厚度切变振动模式

的频率方程为

$$f_n = \frac{n}{2t} \sqrt{\frac{c_{ii}}{\rho}} \quad (1.1.7)$$

$$n = 1, 3, 5, \dots$$

频率常数为

$$K_{f_n} = \frac{n}{2} \sqrt{\frac{c_{ii}}{\rho}} \quad (1.1.8)$$

$$n = 1, 3, 5, \dots$$

式中 t —— 晶片厚度,

c_{ii} —— 切变弹性刚度常数 ($i = 4, 5, 6$ 时, 分别表示 x 面, y 面, z 面)。

§ 1-2 石英晶体的切角与弹性常数

石英晶体是各向异性体, 它的弹性性质是与方向有关的。反映这一性质的弹性常数是一个张量, 常用矩阵表示。在以石英晶体的电轴为 x 轴、机械轴为 y 轴、光轴为 z 轴的直角坐标系 $O-xyz$ 中, 它的弹性柔顺常数矩阵为

$$s = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{22} & s_{23} & s_{24} & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{23} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ s_{14} & s_{24} & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55} & s_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{56} & s_{66} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{13} & -s_{14} & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{13} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ s_{14} & -s_{14} & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 2s_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2s_{14} & 2(s_{11}-s_{12}) \end{pmatrix} \quad (1.2.1)$$

这些弹性常数的数值为

$$s_{11} = 12.71 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N};$$

$$s_{33} = 9.60 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N};$$

$$s_{44} = 20.02 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N};$$

$$s_{66} = 28.64 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N};$$

$$s_{12} = -1.61 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N};$$

$$s_{13} = -1.23 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N};$$

$$s_{14} = 4.41 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}。$$

当弹性柔顺常数 s_{ij} 的足标 $i = j = 1, 2, 3$ 时, 它分别表示在 x, y, z 方向的伸缩弹性性质; 当 $i = j = 4, 5, 6$ 时, 它分别表示在 x, y, z 平面的切变弹性性质; 当 $i \neq j$ 时, 它称为交叉弹性柔顺常数, 例如 s_{12} 、 s_{66} 和 s_{14} 分别表示两种伸缩之间, 两种切变之间和伸缩与切变之间的弹性耦合性质。

从式(1.2.1)可以看出: (1)通过 s_{11} 可产生 x 方向的伸缩振动。由于交叉弹性柔顺常数 $s_{12} \neq 0$, $s_{13} \neq 0$ 和 $s_{14} \neq 0$, 所以 x 方向的伸缩振动又将分别与 y 、 z 方向的伸缩振动, 以及 x 面上的切变振动发生耦合作用。通过 s_{22} 所产生的 y 方向伸缩振动与 s_{11} 的情况类似。而通过 s_{33} 所产生的 z (即光轴)方向伸缩振动, 则不存在与切变振动的耦合作用。(2)通过 s_{44} 可产生 x 面的切变振动。由于 $s_{14} \neq 0$ 和 $s_{24} \neq 0$,

所以 x 面的切变振动又将分别与 x 、 y 方向的伸缩振动发生耦合作用。(3) 通过 s_{55} (或 s_{66}) 可产生 y 面 (或 z 面) 的切变振动。由于 $s_{56} \neq 0$, 所以 y 面与 z 面的切变振动将发生耦合作用。

石英晶体的交叉弹性柔顺常数相对大小为

$$\left| \frac{s_{12}}{s_{11}} \right| = \left| \frac{s_{12}}{s_{22}} \right| \approx \frac{1}{10},$$

$$\left| \frac{s_{13}}{s_{11}} \right| = \left| \frac{s_{23}}{s_{22}} \right| \approx \frac{1}{10},$$

$$\left| \frac{s_{14}}{s_{11}} \right| = \left| \frac{s_{24}}{s_{22}} \right| \approx \frac{1}{3},$$

$$\left| \frac{s_{14}}{s_{44}} \right| = \left| \frac{s_{24}}{s_{44}} \right| \approx \frac{1}{5},$$

$$\left| \frac{s_{56}}{s_{55}} \right| \approx \frac{2}{5},$$

$$\left| \frac{s_{56}}{s_{66}} \right| \approx \frac{1}{3}。$$

由此可见, 两种伸缩振动之间的耦合作用较弱, 两种切变振动之间, 以及伸缩振动与切变振动之间的耦合作用较强。也就是说, 在 $O-xyz$ 坐标系中, 通过 s_{11} 、 s_{22} 、 s_{44} 、 s_{55} 、 s_{66} 所产生的振动都不是单一振动模式。为了获得单一振动模式, 这就要求交叉弹性柔顺常数等于零或接近于零。我们知道弹性常数矩阵的分量与坐标轴的方向有关, 所以通过矩阵坐标变换的方法, 可以找到交叉弹性柔顺常数等于零或接近于零的新坐标系。这就是通常所说的石英晶体的切角和弹性常数的关系问题。

在绕 x 轴旋转 φ_1 角度的 $O-xy'z'$ 坐标系中, 石英晶体的

弹性柔顺常数矩阵为

$$s' = \begin{pmatrix} s'_{11} & s'_{12} & s'_{13} & s'_{14} & 0 & 0 \\ s'_{12} & s'_{22} & s'_{23} & s'_{24} & 0 & 0 \\ s'_{13} & s'_{23} & s'_{33} & s'_{34} & 0 & 0 \\ s'_{14} & s'_{24} & s'_{34} & s'_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s'_{55} & s'_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s'_{56} & s'_{66} \end{pmatrix} \quad (1.2.2)$$

式中 $s'_{11} = s_{11}$;

$$s'_{22} = s_{11} \cos^4 \varphi_1 + s_{33} \sin^4 \varphi_1 + (s_{44} + 2s_{13}) \cos^2 \varphi_1 \sin^2 \varphi_1 - 2s_{14} \cos^3 \varphi_1 \sin \varphi_1;$$

$$s'_{33} = s_{11} \sin^4 \varphi_1 + s_{33} \cos^4 \varphi_1 + (s_{44} + 2s_{13}) \cos^2 \varphi_1 \sin^2 \varphi_1 + 2s_{14} \sin^3 \varphi_1 \cos \varphi_1;$$

$$s'_{44} = (4s_{11} + 4s_{33} - 8s_{13}) \cos^2 \varphi_1 \sin^2 \varphi_1 + s_{44} (\cos^2 \varphi_1 - \sin^2 \varphi_1)^2 + 4s_{14} \cos \varphi_1 \sin \varphi_1 (\cos^2 \varphi_1 - \sin^2 \varphi_1);$$

$$s'_{55} = s_{44} \cos^2 \varphi_1 + s_{66} \sin^2 \varphi_1 - 4s_{14} \cos \varphi_1 \sin \varphi_1;$$

$$s'_{66} = s_{44} \sin^2 \varphi_1 + s_{66} \cos^2 \varphi_1 + 4s_{14} \cos \varphi_1 \sin \varphi_1;$$

$$s'_{12} = s_{12} \cos^2 \varphi_1 + s_{13} \sin^2 \varphi_1 + s_{14} \cos \varphi_1 \sin \varphi_1;$$

$$s'_{13} = s_{12} \sin^2 \varphi_1 + s_{13} \cos^2 \varphi_1 - s_{14} \cos \varphi_1 \sin \varphi_1;$$

$$s'_{14} = 2(s_{13} - s_{12}) \cos \varphi_1 \sin \varphi_1 + s_{14} (\cos^2 \varphi_1 - \sin^2 \varphi_1);$$

$$s'_{23} = (s_{11} + s_{33} - s_{44}) \cos^2 \varphi_1 \sin^2 \varphi_1 + s_{13} (\cos^4 \varphi_1 + \sin^4 \varphi_1) + s_{14} \cos \varphi_1 \sin \varphi_1 (\cos^2 \varphi_1 - \sin^2 \varphi_1);$$

$$s'_{24} = 2(s_{33} \sin^2 \varphi_1 - s_{11} \cos^2 \varphi_1) \cos \varphi_1 \sin \varphi_1 - s_{14} (\cos^2 \varphi_1 - 3 \sin^2 \varphi_1) \cos^2 \varphi_1 + (s_{44} + 2s_{13}) (\cos^2 \varphi_1 - \sin^2 \varphi_1) \cos \varphi_1 \sin \varphi_1;$$

$$s'_{34} = 2(s_{33} \cos^2 \varphi_1 - s_{11} \sin^2 \varphi_1) \cos \varphi_1 \sin \varphi_1 - s_{14} (3 \cos^2 \varphi_1 - \sin^2 \varphi_1) \sin^2 \varphi_1$$

$$-(s_{44} + 2s_{13})(\cos^2\varphi_1 - \sin^2\varphi_1)\cos\varphi_1\sin\varphi_1;$$

$$s'_{56} = (s_{44} - s_{66})\cos\varphi_1\sin\varphi_1 + 2s_{14}(\cos^2\varphi_1 - \sin^2\varphi_1)。$$

交叉弹性柔顺常数 s'_{12} 、 s'_{13} 、 s'_{14} 、 s'_{23} 、 s'_{24} 、 s'_{34} 和 s'_{56} 随角度 φ_1 变化的曲线如图 1-2-1 所示。

由式(1.2.2) 和图 1-2-1 可以看出:

1. s'_{12} 、 s'_{13} 和 s'_{14} 与 φ_1 角的关系。当 $\varphi_1 = 20^\circ \sim 70^\circ$ 时, s'_{12} 的数值很小, 而 $|s'_{13}|$ 则较大, 即 x 方向的伸缩振动与 z' 方向伸缩振动之间耦合作用较大; 当 $\varphi_1 = -20^\circ \sim -70^\circ$ 时, 正好与上述情况相反。而当 $\varphi_1 = -90^\circ \sim -70^\circ$ 、 $-10^\circ \sim 10^\circ$ 和 $70^\circ \sim 90^\circ$ 时, $|s'_{14}|$ 的数值较大, 即 x 方向伸缩振动与 x 面切变振动之间的耦合作用较大。又当 $\varphi_1 \approx \pm 45^\circ$ 时, $s'_{14} = 0$, 即两者之间无耦合作用。由于 s'_{12} 、 s'_{13} 和 s'_{14} 的最小值不在同一角度上, 所以沿 x 方向的厚度伸缩振动不存在单频性的切角。

2. s'_{23} 、 s'_{24} 与 φ_1 角的关系。当 $\varphi_1 = -90^\circ \sim 90^\circ$ 的整个范围内, s'_{23} 的数值都很小, 这表明 y' 方向伸缩振动与 z' 方向伸缩振动之间的耦合作用很小。在 $\varphi_1 = -18^\circ 30'$ 和 $\varphi_1 \approx 43^\circ$ 时, $s'_{24} = 0$, s'_{12} 的数值也较小, 这表明 y' 方向伸缩振动与 x 面的切变振动之间无耦合作用, 而与 x 方向伸缩振动之间的耦合作用也较小。所以, 从单频性考虑, $\varphi_1 = -18^\circ 30'$ 和 $\varphi_1 \approx 43^\circ$ 是 y' 方向伸缩振动的最佳切角。为了较具体地了解一下 s'_{23} 和 s'_{24} 所产生的影响, 图 1-2-2 给出了 $\varphi_1 = 18^\circ$, $\varphi_1 = 0^\circ$, $\varphi_1 = -18^\circ$ 等三种正方形薄片的振动模式示意图。其中, 虚线为假设 $s'_{24} = 0$ 时的情况。 s'_{23} 和 s'_{24} 在这三个角度的数值如表 1-1 所示。从图中看出, 当 $\varphi_1 = 18^\circ$ 时, y' 方向的伸缩振动受到 s'_{24} 的影响最大; 当 $\varphi_1 = 0^\circ$ 时, 同时受到 s'_{23} 和 s'_{24} 的影响; 当 $\varphi_1 = -18^\circ$ 时, 主要受到 s'_{23} 的影响, 而 s'_{24} 的