

●PZT—Pb(Zr·Ti)O₃ 系硬材料/The lead zirconate titanate materials (hard ceramics).

材 料			C-2	C-21	C-201	C-202	C-203	C-204
主要用途			超声波清洗机 超声波水下声纳 超声波探鱼器 采用超声波面部设备		汽车传感器 电位传感器 对于光纤传感器		超声波清洗机 超声波焊接机	超声波加湿器
电气机械 耦合系数	×10 ⁻²	<i>k_p</i>	63	59	60	56	59	63
		<i>k₃₁</i>	37	34	34	32	35	37
		<i>k₃₃</i>	76	71	71	69	71	74
		<i>k_t</i>	52	48	46	47	49	52
		<i>k₁₅</i>	77	74	74	69	70	71
频率常数	m·Hz	<i>N_p</i>	2100	2210	2170	2240	2130	2110
		<i>N₃₁</i>	1550	1630	1570	1620	1530	1530
		<i>N₃₃</i>	1410	1510	1500	1550	1470	1450
		<i>N_t</i>	2020	2090	2100	2120	2020	2070
		<i>N₁₅</i>	880	910	930	990	920	930
相对介电常数		<i>ε₁₁^T/ε₀</i>	1970	1900	2010	1700	1470	2240
		<i>ε₃₃^T/ε₀</i>	1460	1400	1550	1600	1450	2200
等价压电常数	×10 ⁻¹² m/V(C/N)	<i>d₃₁</i>	-158	-131	-145	-130	-145	-190
		<i>d₃₃</i>	367	288	330	315	325	435
		<i>d₁₅</i>	692	634	640	540	520	650
电压输出系数	×10 ⁻³ V·m/N(m ² /C)	<i>g₃₁</i>	-12.7	-10.7	-10.3	-9.4	-11.2	-9.7
		<i>g₃₃</i>	29.2	27.2	24.3	22.3	25.6	22.0
		<i>g₁₅</i>	39.7	37.7	36.0	33.6	39.6	32.7
弹性常数	×10 ¹⁰ N/m ²	<i>Y₁₁^E</i> =1/ <i>S₁₁^E</i>	7.3	8.3	7.9	8.2	7.2	7.2
		<i>Y₃₃^E</i> =1/ <i>S₃₃^E</i>	5.3	6.4	6.4	6.8	6.0	5.7
		<i>Y₅₅^E</i> =1/ <i>S₅₅^E</i>	2.2	2.3	2.4	2.8	2.3	2.4
泊松比		<i>σ</i>	0.30	0.29	0.30	0.31	0.29	0.29
机械品质系数		<i>Q_m</i>	1200	1400	900	1200	2000	520
介电损失	%	<i>tan δ</i>	0.25	0.30	0.29	0.20	0.30	0.25
居里点	°C	<i>T_c</i>	300	307	290	290	350	250
密 度	×10 ³ kg/m ³	<i>ρ</i>	7.60	7.80	7.8	7.85	7.7	7.65
温度系数	<i>f_i</i> <i>T_C</i> ppm/°C	-40~+20°C	200	110	400	400	240	140
		+20~+80°C	90	110	30	150	240	120
	<i>C_T</i> <i>C</i> ppm/°C	-40~+20°C	1820	1810	500	300	1900	1900
		+20~+80°C	4120	3630	4100	3000	3200	3600
材料特点			大功率驱动器		高 <i>d₃₃</i> ·稳定的温度系数		高 <i>d₃₃</i> & <i>Q_m</i> 高 <i>T_c</i>	中 <i>Q_m</i> 高 <i>k₃₃</i> · <i>d₃₃</i> .

※ 材料特性测试方法, 除了特色的一部分, 符合日本电子信息技术产业协会JEITA EM-4501A的标准。

●PZT—Pb(Zr·Ti)O₃ 系硬材料 / The lead zirconate titanate materials (hard ceramics).

材 料			C-205	C-213	C-213P	C-3	C-4
主要用途			超声波清洗机·超声波焊机·医疗雾化器 医疗手术刀·超声波马达·牙洁牙机			超声波探伤仪 超声波厚度计 博尔特轴向力计	
电气机械 耦合系数	×10 ⁻²	<i>k_p</i>	58	58	60	45	36
		<i>k₃₁</i>	34	34	35	26	23
		<i>k₃₃</i>	70	70	70	64	57
		<i>k_t</i>	49	48	47	49	39
		<i>k₁₅</i>	68	70	69	64	53
频率常数	m·Hz	<i>N_p</i>	2270	2230	2210	2460	2520
		<i>N₃₁</i>	1660	1620	1630	1810	1840
		<i>N₃₃</i>	1560	1540	1540	1710	1760
		<i>N_t</i>	2110	2090	2070	2140	2150
		<i>N₁₅</i>	990	960	950	1060	1100
相对介电常数		<i>ε₁₁^T/ε₀</i>	1650	1590	1750	820	560
		<i>ε₃₃^T/ε₀</i>	1580	1470	1470	510	330
等价压电常数	×10 ⁻¹² m/V(C/N)	<i>d₃₁</i>	-136	-135	-139	-55	-39
		<i>d₃₃</i>	322	310	306	154	110
		<i>d₁₅</i>	492	510	542	381	201
电压输出系数	×10 ⁻³ V·m/N(m ² /C)	<i>g₃₁</i>	-9.7	-10.2	-10.7	-12.0	-12.8
		<i>g₃₃</i>	22.7	23.4	23.5	32.4	33.7
		<i>g₁₅</i>	33.6	36.4	34.9	43.5	40.8
弹性常数	×10 ¹⁰ N/m ²	<i>Y₁₁^E</i> =1/ <i>S₁₁^E</i>	8.6	8.2	8.4	10.0	10.3
		<i>Y₃₃^E</i> =1/ <i>S₃₃^E</i>	6.8	6.6	6.7	8.2	8.7
		<i>Y₅₅^E</i> =1/ <i>S₅₅^E</i>	2.7	2.6	3.3	2.5	3.5
泊松比		<i>σ</i>	0.29	0.29	0.28	0.28	0.29
机械品质系数		<i>Q_m</i>	2140	2500	1520	1900	1700
介电损失	%	<i>tan δ</i>	0.40	0.30	0.10	0.20	0.35
居里点	℃	<i>T_c</i>	280	315	318	270	330
密 度	×10 ³ kg/m ³	<i>ρ</i>	7.8	7.8	7.9	7.60	7.60
温度系数	<i>f_i</i> <i>T_C</i> ppm/℃	-40~+20℃	30	200	150	10	20
		+20~+80℃	200	100	20	-180	-170
	<i>CTC</i> ppm/℃	-40~+20℃	2490	2100	1900	2670	2250
		+20~+80℃	3230	3400	3900	5370	4360
材料特点			高 <i>Q_m</i> & <i>d₃₃</i>		低 <i>tan δ</i>	低 <i>ε₃₃^T</i>	

※ 材料特性测试方法, 除了特色的一部分, 符合日本电子信息技术产业协会JEITA EM-4501A的标准。

●PZT—Pb(Zr·Ti)O₃ 系材料 / The lead zirconate titanate materials (hard ceramics).

ceramics). 材 料			C-5	C-6	C-6H	C-62	C-63	C-64	C-601	C-7	C-8
主要用途			骨传导 传声器 声学 传感器	超声波传感器 (汽车传感器·流量计·气泡传感器·液位测量、等) 医用超声探头(用于诊断成像) 适用于各种执行器						声音皮卡	
电气机械 耦合系数	×10 ⁻²	<i>k_p</i>	64	66	70	68	59	63	65	58	65
		<i>k₃₁</i>	38	39	41	40	33	35	37	34	38
		<i>k₃₃</i>	73	76	77	77	68	73	76	72	77
		<i>k_t</i>	53	52	50	52	48	50	50	53	52
		<i>k₁₅</i>	78	74	76	76	66	71	73	64	70
频率常数	m·Hz	<i>N_p</i>	2060	1960	1960	1960	2130	1970	2060	2080	1980
		<i>N₃₁</i>	1530	1420	1420	1440	1480	1380	1460	1440	1410
		<i>N₃₃</i>	1400	1350	1380	1350	1500	1360	1380	1410	1350
		<i>N_t</i>	2050	2010	2110	2040	2060	1970	2070	2070	2050
		<i>N₁₅</i>	850	850	860	850	950	850	890	950	910
相对介电常数		<i>ε₁₁^T/ε₀</i>	2140	2270	2550	2730	1850	1960	2400	3670	3100
		<i>ε₃₃^T/ε₀</i>	1170	2130	2400	2600	2000	1850	2300	4660	3480
等价压电常数	×10 ⁻¹² m/V (C/N)	<i>d₃₁</i>	-140	-210	-240	-234	-165	-185	-210	-271	-274
		<i>d₃₃</i>	333	472	490	500	320	435	500	665	627
		<i>d₁₅</i>	764	758	800	860	530	670	730	737	779
电压输出系数	×10 ⁻³ V·m/N (m ² /C)	<i>g₃₁</i>	-14.5	-11.5	-11.2	-10.6	-9.5	-11.4	-10.0	-6.8	-8.8
		<i>g₃₃</i>	32.1	25.0	23.2	24.4	23.0	24.4	23.0	15.0	19.7
		<i>g₁₅</i>	40.3	37.7	35.6	35.6	32.5	38.5	34.0	22.7	28.4
弹性常数	×10 ¹⁰ N/m ²	<i>Y₁₁^E=1/δ₁₁^E</i>	7.2	6.2	6.3	6.3	6.7	5.9	6.7	6.1	6.0
		<i>Y₃₃^E=1/δ₃₃^E</i>	5.3	4.9	5.2	4.9	6.2	5.1	5.0	5.2	4.8
		<i>Y₅₅^E=1/δ₅₅^E</i>	1.9	1.9	2.0	1.9	2.5	2.0	2.2	2.4	2.2
泊松比		<i>σ</i>	0.29	0.32	0.31	0.30	0.37	0.34	0.33	0.39	0.32
机械品质系数		<i>Q_m</i>	90	80	70	75	90	80	110	45	65
介电损失	%	<i>tan δ</i>	1.65	1.60	2.0	1.65	1.2	1.5	0.9	2.50	1.90
居里点	°C	<i>T_c</i>	305	295	290	245	295	345	285	162	193
密 度	×10 ³ kg/m ³	<i>ρ</i>	7.65	7.65	7.8	7.60	7.6	7.7	7.8	7.40	7.45
温度系数	<i>f_T</i> TC ppm/°C	-40~+20°C	-550	-330	-250	-380	-20	-180	-260	-540	-340
		+20~+80°C	-680	-130	-5	170	80	180	-120	180	-20
	<i>C</i> TC ppm/°C	-40~+20°C	4230	3590	3400	3860	1850	3500	3300	4330	3940
		+20~+80°C	7960	4850	4000	5610	2550	3600	4000	8030	6050
材料特点			中 <i>ε₃₃^T</i>	一般用途	高 <i>k₃₃</i> & <i>d₃₃</i>		低 温度系数	高 <i>T_c</i>	高 <i>k₃₃</i> & <i>d₃₃</i>	高 <i>ε₃₃^E</i> 低 <i>Q_m</i>	中 <i>ε₃₃^E</i>

※ 材料特性测试方法，除了特色的一部分，符合日本电子信息技术产业协会JEITA EM-4501A的标准。

●PZT-Pb(Zr·Ti)O₃ 系材料 / The lead zirconate titanate materials (hard ceramics).

ceramics).			C-82	C-83H	C-84	C-9	C-91	C-91H	C-92H	C-93
材 料										
主要用途			医用超声探头 (用于诊断成像) 适用于各种执行器							
电气机械 耦合系数	×10 ⁻²	<i>k_p</i>	65	73	69	57	60	69	72	68
		<i>k₃₁</i>	37	43	43	37	37	42	44	40
		<i>k₃₃</i>	75	78	79	69	69	74	78	77
		<i>k_t</i>	51	51	54	49	49	50	51	53
		<i>k₁₅</i>	70	76	76	58	65	68	69	71
频率常数	m·Hz	<i>N_p</i>	2030	1930	1900	2040	1960	1950	1910	1890
		<i>N₃₁</i>	1430	1410	1400	1440	1380	1410	1430	1410
		<i>N₃₃</i>	1390	1380	1290	1390	1380	1390	1320	1300
		<i>N_t</i>	2090	2150	2000	1950	1960	2080	2070	1970
		<i>N₁₅</i>	900	880	840	950	920	900	930	870
相对介电常数		<i>ε₁₁^T/ε₀</i>	3090	3900	4870	6050	4400	4900	4400	5600
		<i>ε₃₃^T/ε₀</i>	3650	4200	4760	6640	5500	5800	5300	6050
等价压电常数	×10 ⁻¹² m/V (C/N)	<i>d₃₁</i>	-266	-335	-356	-354	-330	-375	-366	-371
		<i>d₃₃</i>	600	670	774	718	640	710	770	826
		<i>d₁₅</i>	781	980	1140	827	820	920	848	1080
电压输出系数	×10 ⁻³ V·m/N (m ² /C)	<i>g₃₁</i>	-8.3	-9.0	-8.4	-6.0	-7.0	-7.3	-7.8	-6.9
		<i>g₃₃</i>	18.5	17.9	18.4	12.2	13.5	13.9	16.4	15.4
		<i>g₁₅</i>	28.6	28.3	26.6	15.5	21.0	21.2	21.8	21.8
弹性常数	×10 ¹⁰ N/m ²	<i>Y₁₁^E</i> =1/ <i>S₁₁^E</i>	6.2	6.1	6.0	6.5	5.9	6.4	6.6	6.3
		<i>Y₃₃^E</i> =1/ <i>S₃₃^E</i>	5.1	5.1	4.4	5.4	5.4	5.5	4.9	4.6
		<i>Y₅₅^E</i> =1/ <i>S₅₅^E</i>	2.2	2.1	1.9	2.6	2.4	2.4	2.6	2.5
泊松比		<i>σ</i>	0.34	0.29	0.30	0.36	0.38	0.32	0.28	0.27
机械品质系数		<i>Q_m</i>	65	65	46	25	30	24	28	67
介电损失	%	<i>tan δ</i>	1.90	2.2	2.0	4.5	3.0	3.7	3.6	1.7
居里点	℃	<i>T_c</i>	195	220	186	130	165	170	183	150
密 度	×10 ³ kg/m ³	<i>ρ</i>	7.50	7.7	7.67	7.75	7.75	8.1	8.1	7.91
温度系数	<i>f_T</i> TC ppm/℃	-40~+20℃	-260	-290	-704	-970	-1000	-1370	-1580	-690
		+20~+80℃	30	100	-185	540	550	330	660	1360
	CTC ppm/℃	-40~+20℃	3650	3500	4360	7610	6000	8400	8450	7190
		+20~+80℃	5440	5300	7590	9630	4500	8800	6780	5360
材料特点			高 <i>ε₃₃^E·d₃₃</i> 、低 <i>Q_m</i>							

※ 材料特性测试方法, 除了特色的一部分, 符合日本电子信息技术产业协会JEITA EM-4501A的标准。

※ C-92材料特性的Ni-Cr和Au电极溅射条件。

The material characteristics of piezoceramics

压电陶瓷的材料性质

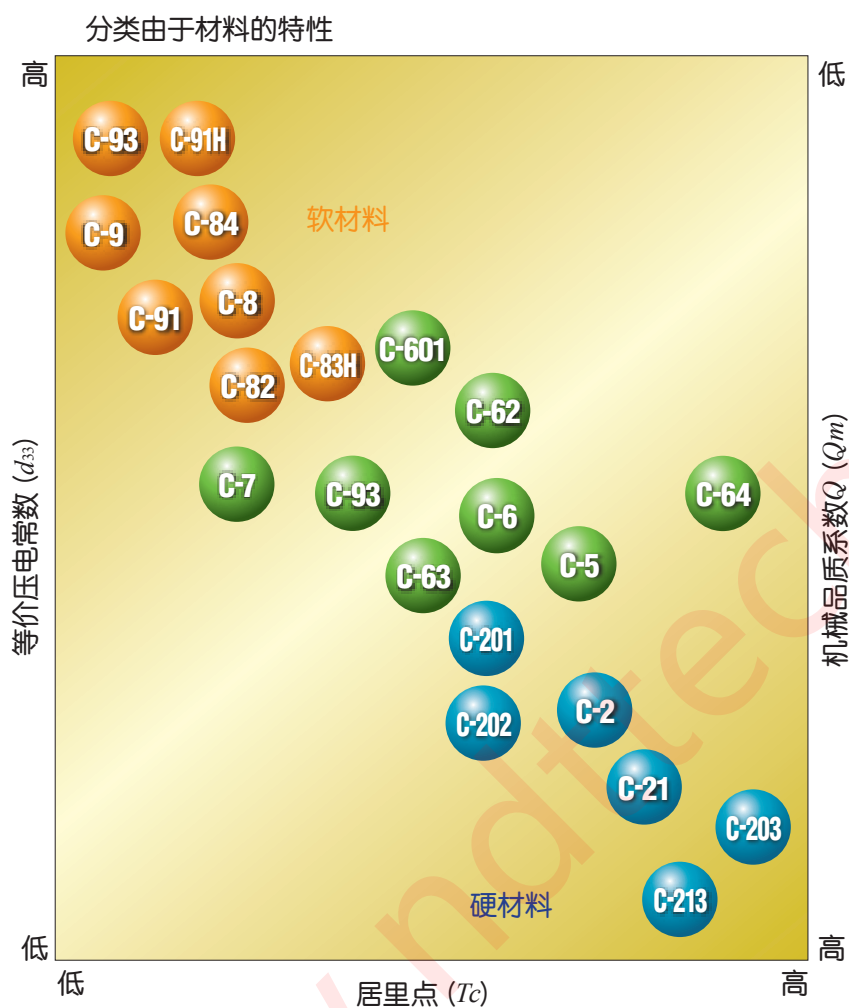
● PT-PbTiO₃ ● PN-PbNb₂O₆ ● BiT-Bi₄Ti₃O₁₂ 系材料 / The lead titanate, metaniobate & bismuth titanate materials.

材 料			PT			PN	BiT
			M-1	M-5	M-6	F-100	B-600
主要用途			超声波流量计	超声波探伤仪 超声波液位计 LCD触摸传感器 高强度聚焦超声		超声波探伤仪 超声波厚度计	超声波流量计 (高温型)
电气机械 耦合系数	×10 ⁻²	k_p	6.0	6.0	4.0	(30)	4.7
		k_{31}	6.5	6.0	2.6	(24)	2.9
		k_{33}	37	47	53	(31)	—
		k_t	38	43	51	39	20.1
		k_{15}	—	—	37	(39)	—
频率常数	m·Hz	N_p	2630	2800	2860	(2015)	2710
		N_{31}	2050	2150	2200	(1570)	2080
		N_{33}	2060	2150	2240	(1580)	—
		N_t	2130	2250	2230	1630	2180
		N_{15}	—	—	1450	(1030)	—
相对介电常数		$\varepsilon_{11}^T/\varepsilon_0$	—	—	250	(370)	—
		$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	185	220	215	300	150
等价压电常数	×10 ⁻¹² m/V(C/N)	d_{31}	-4.3	-4.7	-3.7	(-55)	-2.9
		d_{33}	43.9	58.2	71.0	80	(19.0)
		d_{15}	—	—	41.0	(145)	—
电压输出系数	×10 ⁻³ V·m/N(m ² /C)	g_{31}	-2.7	-2.4	-1.6	(-19)	-2.2
		g_{33}	25.1	30.3	37.3	(22)	(14.3)
		g_{15}	—	—	21.3	(45)	—
弹性常数	×10 ¹⁰ N/m ²	$Y_{11}^E=1/S_{11}^E$	11.9	13.9	13.2	(5.4)	12.4
		$Y_{33}^E=1/S_{33}^E$	13.5	14.4	11.6	(5.5)	—
		$Y_{55}^E=1/S_{55}^E$	—	—	8.7	(2.3)	—
泊松比		σ	0.26	0.20	0.21	—	0.22
机械品质系数		Qm	1200	1450	850	20	5980
介电损失	%	$\tan \delta$	1.5	1.5	2.0	(1.0)	0.30
居里点	℃	T_c	385	310	250	530	670
密 度	×10 ³ kg/m ³	ρ	7.6	7.4	6.92	5.7	7.2
温度系数	f_T TC ppm/℃	-40~+20℃	-70	-60	-50	(-1400)	-66
		+20~+80℃	-70	-40	-100	(-800)	-66
	C TC ppm/℃	-40~+20℃	2350	2550	3000	(950)	450
		+20~+80℃	3600	4000	4500	(1100)	820
材料特点			各向异性, $k_t>k_p$			低 $Qm \cdot$ 高 $T_c \cdot$ 低 ρ	各向异性, $k_t>k_p$ 高 Qm
			高 T_c	高 Qm	高 k_t		

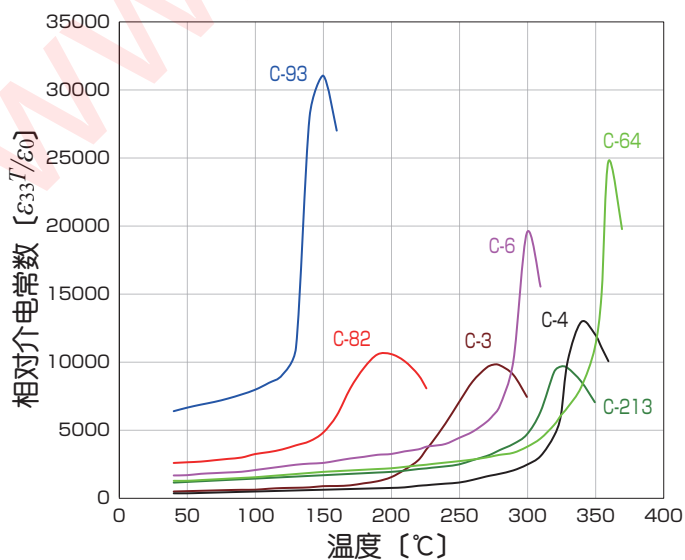
※ 材料特性测试方法, 除了特色的一部分, 符合日本电子信息技术产业协会JEITA EM-4501A的标准。
※ 括号内的值是参考值。

典型的温度特性等

该材料的性质

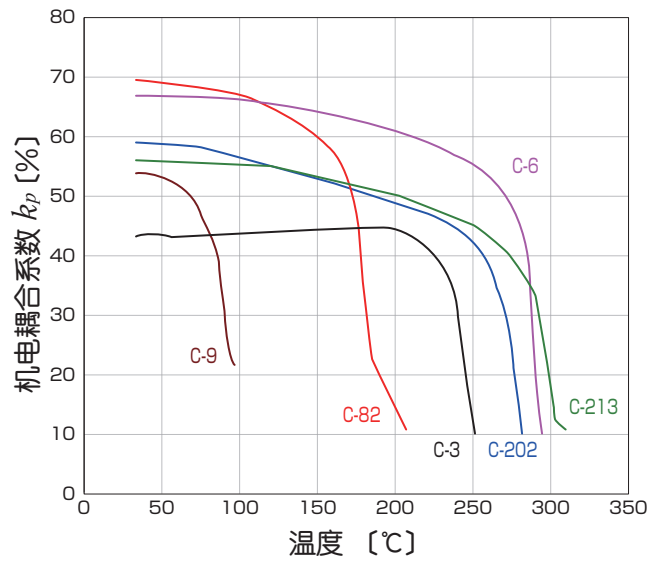


相对介电常数的温度特性

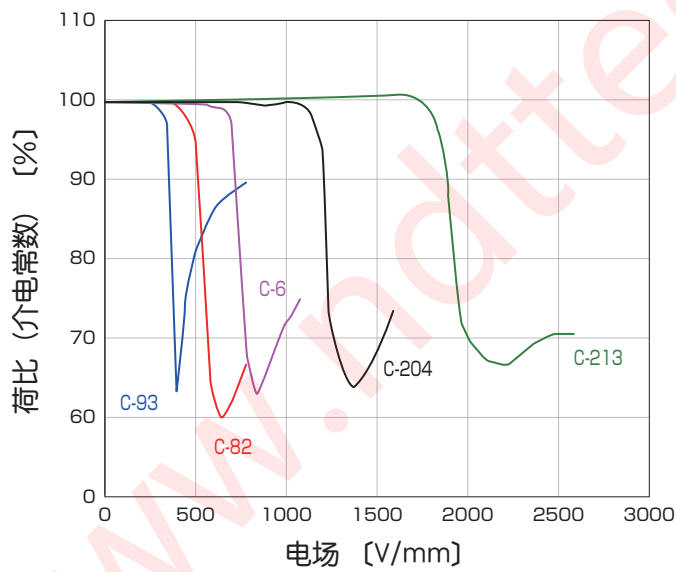


典型的温度特性等

的机电耦合系数的温度特性



介电常数的温度特性

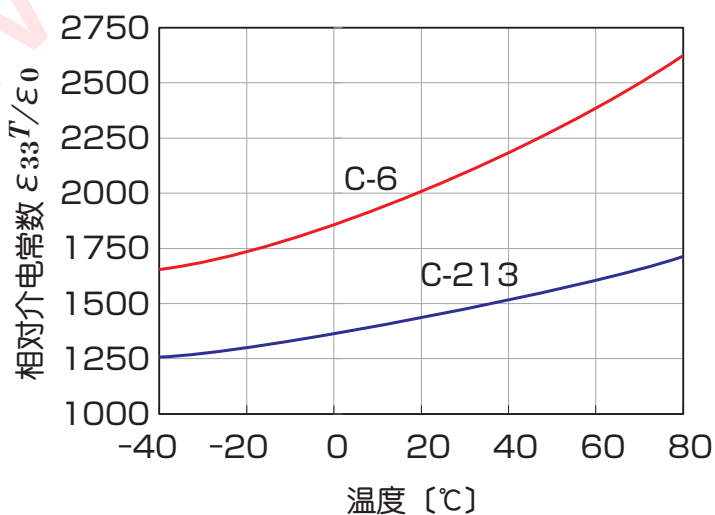
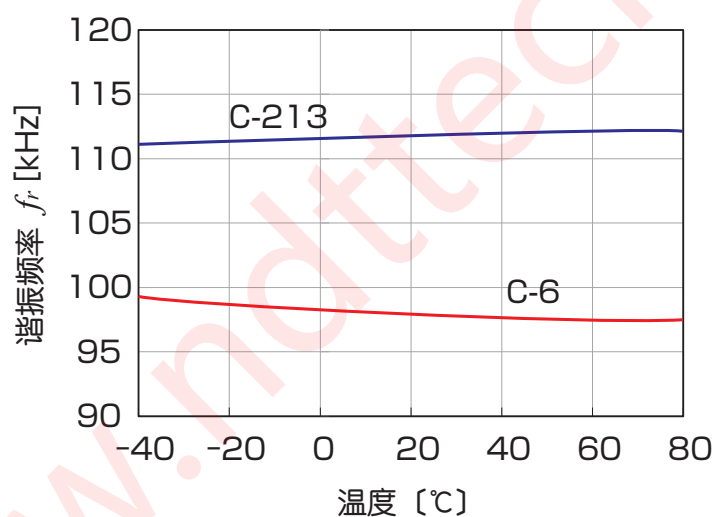
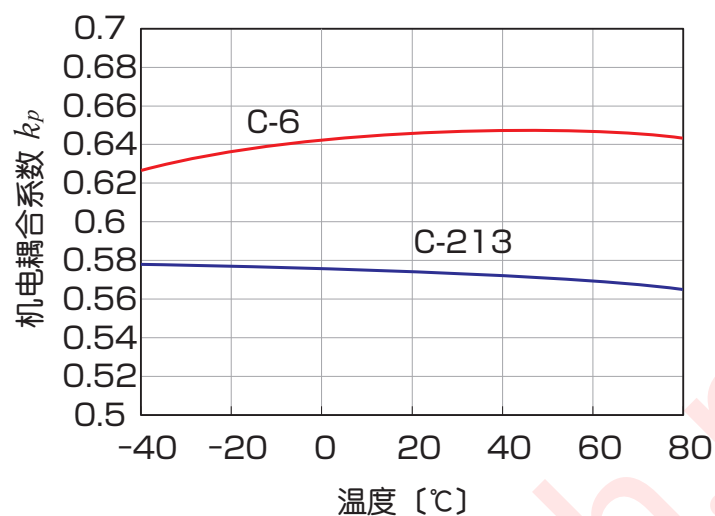


压电陶瓷元件组



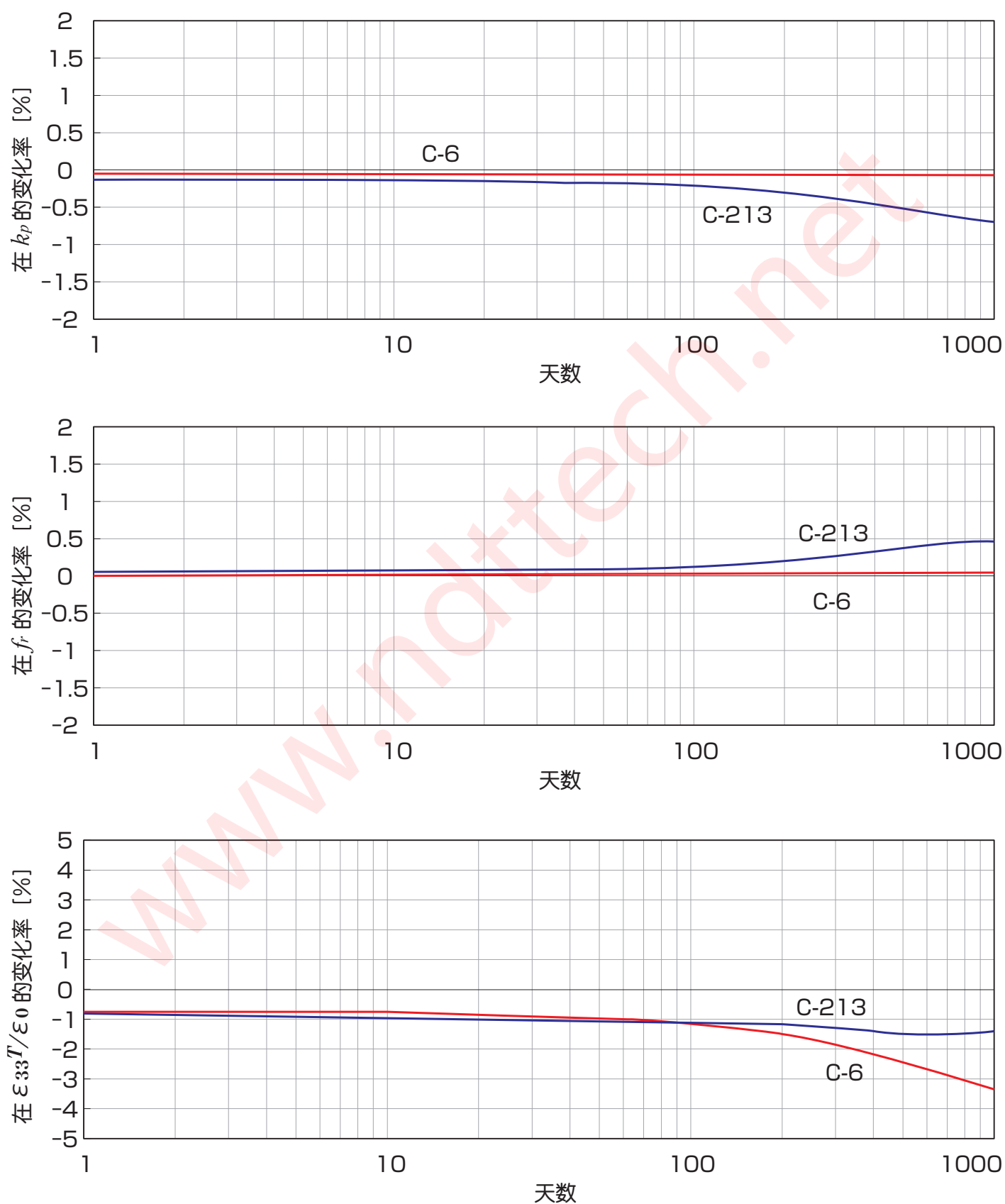
典型的温度特性等

的温度特性的例子 C-6材/C-213材



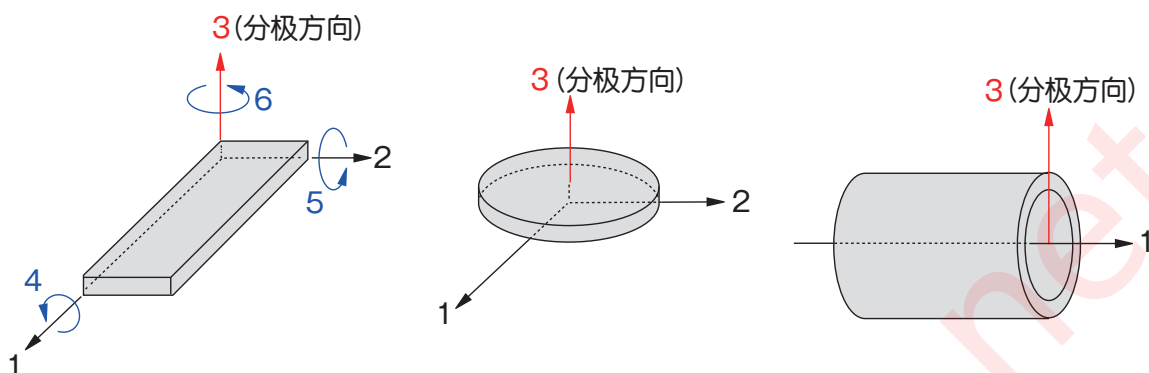
典型的温度特性等

老化特性的实例 C-6材/C-213材



压电材料物理特性概要

压电特性的表述是必须有形状、方向等必要条件的。这些条件是通过矢量和张力量显示的，因此，虽然上下段附属代码，可是在特征列表中都分别不同，大致描述如下：



S_{11}
轴1方向表示压力
轴1方向表示拉力

C_{55}
轴2转动方向表示抗剪应力
轴2转动方向表示减应变力

d_{31}
轴1方向表示拉力
轴3方向表示电极常规方向

g_{33}
轴3方向表示压力
轴3方向表示电极常规方向

d_{15}
轴2转动方向表示剪应变
轴1方向表示电极的法线方向

ϵ_{33}
轴3方向表示电位移
轴3方向表示电极常规方向

k_p, N_p : 磁片半径方向的特征为电极与分极轴正交

k_t, N_t : 磁盘厚度方向的特征为电极与分极轴正交

$k_{31}, N_{31}, d_{31}, g_{31}$: 矩形板长度的特征为电极与分极轴正交

$k_{33}, N_{33}, d_{33}, g_{33}$: 棒形分极方向的特征为电极与分析轴正交

$k_{15}, N_{15}, d_{15}, g_{15}$: 相对有平行于极化方向的电极的板的极化或直交(剪切)方向上的特性

ϵ_{11}^T : 有平行于极化方向的电极的板的电极之间的自由电位移(应力恒定性)

ϵ_{33}^T : 有相对于极化方向的直交电极的板的极化轴上的自由电位移(应力恒定性)

ϵ_0 : 真空介电常数

Y_{11}^E, s_{11}^E : 在极化方向受电极的垂直板块的横向弹度(在电场持续的情况下)

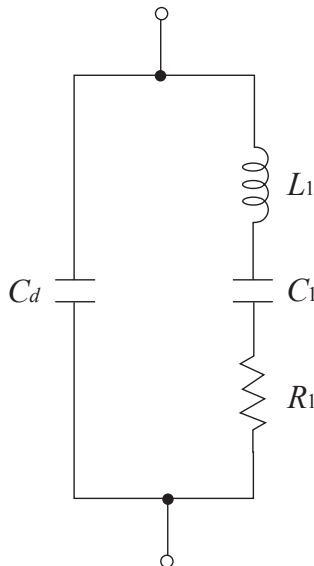
Y_{33}^E, s_{33}^E : 有与极化方向相对的直交电极的板的电极端的方向上的长度弹力(电场的稳定性)

Y_{55}^E, s_{55}^E : 有平行与极化方向的电极的板的极化轴(或, 正交)方向上的剪切弹力(电场稳定性)

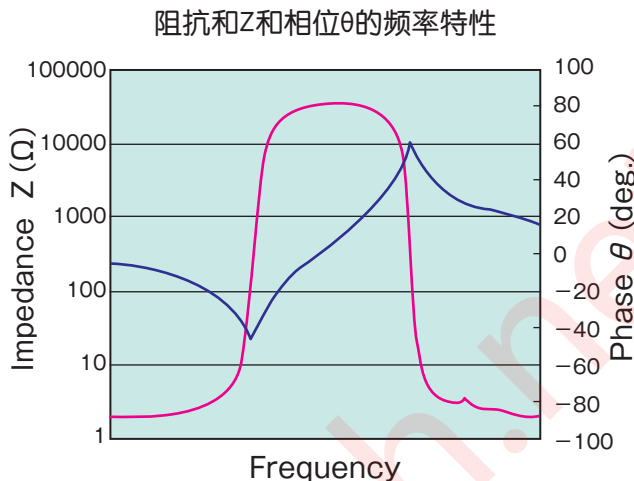
压电材料物理特性概要

■等效电路

压电陶瓷如图所示的与振动频率接近的等效电路



L_1 : 等效感应系数
 C_1 : 等效容量
 R_1 : 共振阻抗
 C_d : 制动容量



阻抗和共振频率接近的相位特征显示在上面的图表中

■机电耦合系数 k_p 、 k_t 、 k_{31} 、 k_{33} 、 k_{15}

耦合因数是一种系数, 由(生成的机械能)对于(供给电能)或(生成的电能)对于(供给的机械能)比的平方根来定义。也显示了压电效应的大小一个量。从共振和反共振频率得来的实用公式如下所示:

$$\frac{1}{k^2} = a \cdot \frac{f_r}{f_a - f_r} + b$$

f_r : 共振频率

f_a : 反共振频率

动模式系统 a , b 的值

振动模式		a	b
板状的幅度振动	(k_{31})	0.405	0.595
圆筒形呼吸振动	(k_{31})	0.500	0.750
圆片的扩张振动	(k_p)	0.395	0.574
棒材的纵向振动	(k_{33})	0.405	0.810
板材的厚度方向振动	(k_t)	0.405	0.810
厚度剪切振动	横向效应 (k_{15})	0.405	0.595
	纵向效应 (k_{15})	0.405	0.810

泊松比 $\sigma = 0.3$

压电材料物理特性概要

■频率常数 N_p 、 N_t 、 N_{31} 、 N_{33} 、 N_{15}

频率常数是基本谐振频率(f_r)沿与振动方向的长度的乘积。此常数主要用来探测谐振频率和尺寸。下面的公式反映了不同震动模式下的频率常数。

圆盘直径方向的振动	$N_p = f_r \cdot D$	板厚度方向振动模式	$N_t = f_r \cdot t$
矩形板的长度振动模式	$N_{31} = f_r \cdot \ell$	该板的厚度剪切振动	$N_{15} = f_r \cdot t$
棒长度纵向振动模式	$N_{33} = f_r \cdot \ell$		

■介电常数 ε_{11}^T 、 ε_{33}^T 和电容 C^T

给定电场下引起的电位移为介电常数。由在远低于谐振频率时的频率下的静电容量求出，用于进行压电常数的分析等。此外， $\varepsilon^T/\varepsilon_0$ (比介电率)为介电常数(ε^T)与真空介电常数(ε_0)之比。它们之间的关系可见下列表达式。

$$C^T = \varepsilon^T \cdot \frac{A}{t}$$

这可变为下面的表达式特征表中已经描述了(比介电率 $\varepsilon^T/\varepsilon_0$)

$$C^T = \frac{\varepsilon^T}{\varepsilon_0} \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{t}$$

$$A: \text{电极面积 [m}^2\text{]} \quad t: \text{电极间距 [m]} \quad \varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ [F/m]}$$

■压电定数 d_{31} 、 d_{33} 、 d_{15} 、 g_{31} 、 g_{33} 、 g_{15}

压电常数是一种如耦合因数同样表示压电效果大小的常数。不同的机械边界条件和电子边界条件就可导出四类压电常数，即压电变形常数 d ，压电电压常数 g ，压电应力常数 e 和 h 。实际中经常使用压电变形常数 d 和压电电压常数 g 。四类常数分别定义如下：

$$d = \frac{\text{所产生的应变}}{\text{鉴于电场强度}} \left(\frac{\frac{m}{m}}{\frac{V}{m}} = \frac{m}{V} \right) = \frac{\text{所产生的电荷密度}}{\text{鉴于应力}} \left(\frac{\frac{C}{m^2}}{\frac{N}{m^2}} = \frac{C}{N} \right)$$

压电材料物理特性概要

$$g = \frac{\text{所产生的电场强度}}{\text{鉴于应力}} \left(\frac{\frac{V}{m}}{\frac{N}{m^2}} = \frac{V \cdot m}{N} \right) = \frac{\text{所产生的应变}}{\text{鉴于电荷密度}} \left(\frac{\frac{m}{C}}{\frac{m^2}{C}} = \frac{m^2}{C} \right)$$

对应于输入电压下的电位移值可由压电变常数 d 依据上述表达式计算得出, 对应于附加功率下的输出电压值可由压电电压常数 g 依据上述表达式计算得出。压电应力常数 e 和 h 与压电电压常数 g 、压电变形常数 d 分别互为倒数关系。

■弹性定数 Y_{11}^E 、 S_{11}^E 、 Y_{33}^E 、 S_{33}^E 、 Y_{55}^E 、 S_{55}^E

变形长度与其垂直应力之比为弹性常数 Y 。如不考虑其他方向, 仅考虑一个特别的方向, 则就是弹性刚度常数 c 。弹性刚度常数与弹性柔度常数 s 互为倒数关系。

$$Y = c = \frac{1}{s}$$

弹性常数是对于压电陶瓷与决定谐振频率的频率常数 N 直接相关的常数, 也是与发电功率相关的常数。

■泊松比 σ

泊松比是由均匀分布的垂直应力所引起的横向应变与相应的垂直应变之比。

$$\sigma = \frac{\alpha}{\beta} = -\frac{S_{12}^E}{S_{11}^E}$$

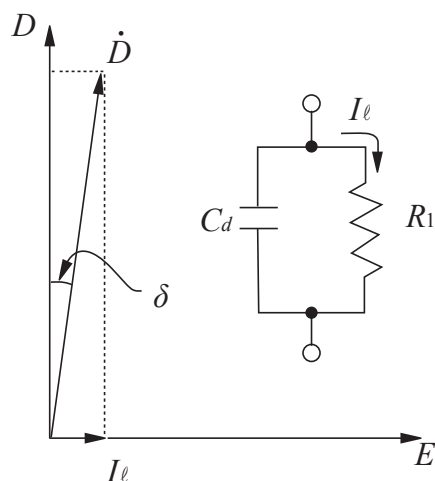
泊松比是一个与谐振频率和耦合区域的共振相关的量。

■介电损耗 $\tan \delta$

假如给予压电体方波频率下的正弦交流波电场, 电位移在 $\pi/2$ 的相位下振动。但是, 事实上, 电位移应该在 时间下延迟, 并产生一个损耗量。具体可见如下示意图。在等效电路中 C_d 、 R_l 和 $\tan \delta$ 关系可见下面的公式。损耗将变为诸如电介质热电变化之类的行为。

压电材料物理特性概要

向量图的压电与介电损耗



$$\tan \delta = \frac{1}{\omega C_d R_1}$$

■机械的 Q Q_m

因压电体有弹性损耗和电介质损耗，交流电场应力产生相差 δ_m

$$\tan \delta_m = \frac{1}{Q_m}$$

这个 Q_m 就是机械 Q ，其与等效电路的关系变为下面的公式。

$$Q_m = \frac{1}{\omega_s C_1 R_1} = \omega_s L_1 R_1 \doteq \frac{1}{4\pi Z_r C (f_a - f_r)}$$

ω_s : 角频率
 C_1 : 等效容量
 R_1 : 共振阻力
 L_1 : 等效电感

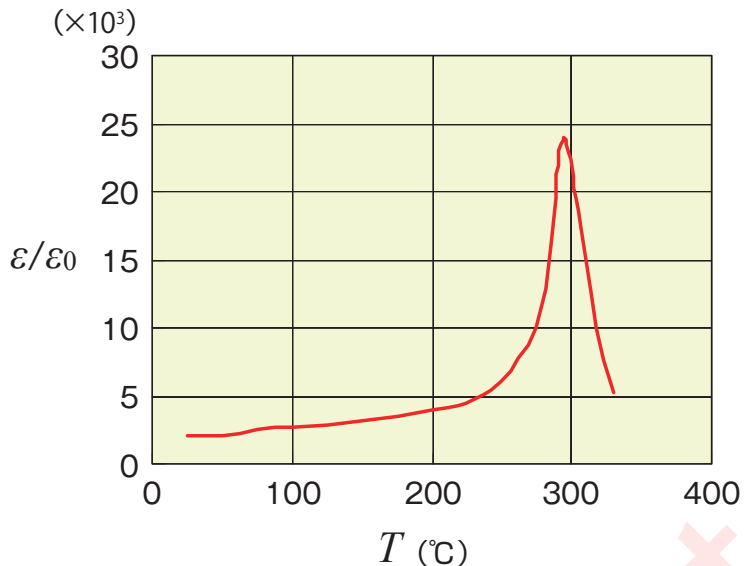
Z_r : 谐振阻抗
 C : 静电能力
 f_r : 共振频率
 f_a : 反共振频率

Q_m 的大小与谐振频率下的机械振动锐度相关。

压电材料物理特性概要

■居里点 T_c

压电体的电介(常数) ε 随着温度 T 的上升变化到无穷大。结果, 晶体变得不稳定, 晶体系统将迅速改变对边界的一个特定的温度 θ_0 , 这个温度 θ_0 是一个居里点, 并显示了临输出温度为散失极化和压电特性的。介电常数 ε 从高温区变化遵特以下公式

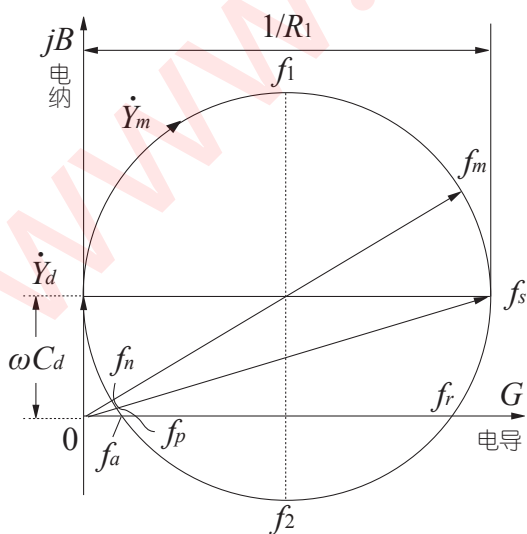


$$\varepsilon = \frac{c}{T - \theta_0}$$

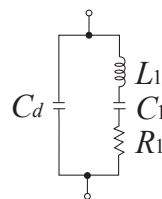
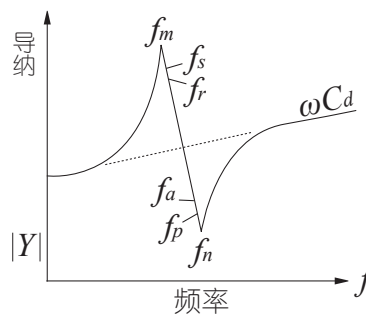
(但是, c , θ_0 是常数)

■关于压电陶瓷振子的导纳特性

压电陶瓷谐振器的导纳圆



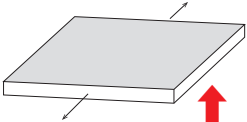
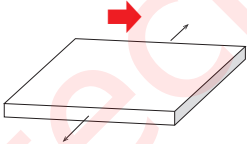
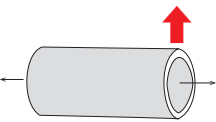
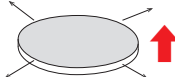
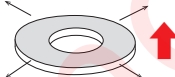
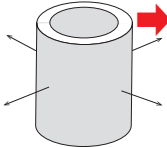
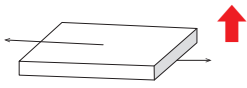
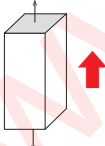
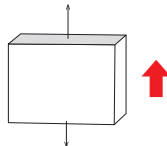
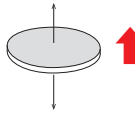
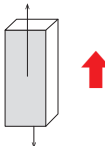
振动器的导纳图



压电材料物理特性概要

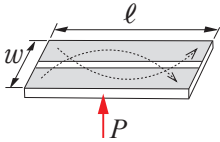
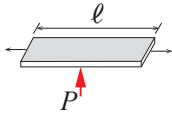
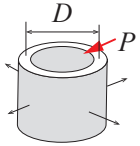
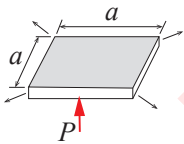
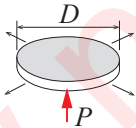
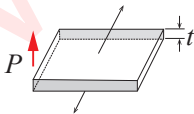
- f_s : 机械串联共振频率 (最大电导频率)
 f_p : 机械并联共振频率
 f_r : 共振频率
 f_a : 反共振频率 } (电纳频率=0或相位= 0频率)
 f_m : 绝对值成为导纳的最大频率 (最大点电流)
 f_n : 绝对值成为导纳的最小频率 (最小点电流)
 f_1 : 电纳频率变为最大
 f_2 : 电纳频率变为最小 } 象限频率

■ 振动器形状和振动模式的例子

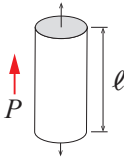
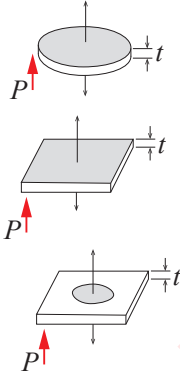
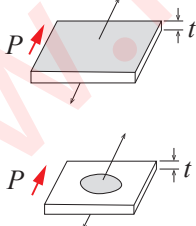
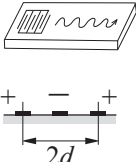
横向效应振动器			
 (a) 棒的轴向振动	 (b) 板的翻转振动	 (c) 板的横向平移	 (d) 柱体的轴向振动
 (e) 圆板的径向振动	 (f) 圆环的径向振动	 (g) 圆筒的径向振动	 (h) 厚度切变振动模式
纵向效应振动器			
 (i) 棒的轴向振动	 (j) 板在宽度方向上的振动	 (k) 圆片在厚度方向上的振动	 (l) 厚度切变模式振动

↑: 分极方向

■各种振动器的基本共振频率

振动模式	振动子形状	基本振动的共振频率
纵向效应振动器	屈曲振动 	$f_r = \frac{\pi}{4\sqrt{3}} \cdot \frac{w}{\ell^2} \cdot \sqrt{\frac{2}{(1+\sigma^E)}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho S_{11}^E}}$
	长度振动 (呼吸振动)  	$f_r = \frac{1}{2\ell} \sqrt{\frac{1}{\rho S_{11}^E}}$ $f_r = \frac{1}{\pi D} \sqrt{\frac{1}{\rho S_{11}^E (1+\sigma^E)(1-\sigma^E)}}$ D : 平均直径
	面积振动 	$f_r = \frac{1}{2a} \sqrt{\frac{1}{\rho S_{11}^E (1-\sigma^E)}}$
	径向振动 	$f_r = \frac{\eta_1}{\pi D} \sqrt{\frac{1}{\rho S_{11}^E (1+\sigma^E)(1-\sigma^E)}}$ 在 $\sigma^E=0.35$ 的情况下 $\eta_1=2.08$
	厚度切变振动 模式 	$f_r = \frac{1}{2t} \sqrt{\frac{C_{55}^E}{\rho}}$

压电材料物理特性概要

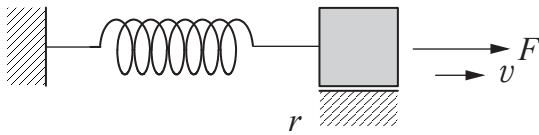
振动模式	振动子形状	基本振动的共振频率
长度振动		$f_r = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{c_{33}^E}{\rho}} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{(1-k_{33}^2) c_{33}^D}{\rho}}$ $f_a = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{1}{\rho s_{33}^D}} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{1}{\rho s_{33}^E (1-k_{33}^2)}}$
厚度振动		$f_r = \frac{1}{2t} \sqrt{\frac{c_{33}^E}{\rho} \cdot \frac{(1-\sigma^E)}{(1+\sigma^E)(1-2\sigma^E)}}$ $f_a = \frac{1}{2t} \sqrt{\frac{c_{33}^D}{\rho}} = \frac{1}{2t} \sqrt{\frac{c_{33}^E}{\rho (1-k_t^2)}}$
厚度切变振动模式		$f_r = \frac{1}{2t} \sqrt{\frac{c_{33}^E}{2(1+\sigma^E)\rho}}$ $f_a = \frac{1}{2t} \sqrt{\frac{c_{55}^D}{\rho}} = \frac{1}{2t} \sqrt{\frac{1}{\rho s_{55}^E (1-k_{15}^2)}}$
弹性表面波振动		$f_r = \frac{v_s}{\lambda} = \frac{v_s}{2d} \quad v_s: \text{弹性表面波的音速}$

$S_{11}^D = S_{11}^E (1 - k_{31}^2) \quad S_{33}^D = S_{33}^E (1 - k_{33}^2) \quad C_{55}^E = C_{55}^D (1 - k_{15}^2) \quad C_{55}^E = \frac{1}{S_{55}^E}$

参考书目：『压电陶瓷技术手册』（Fuji Ceramics Corporation）

引导以使用压电陶瓷元件

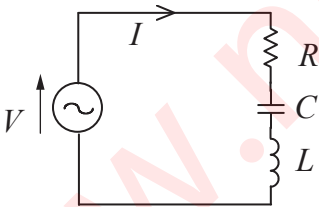
■电气系统和机械系统



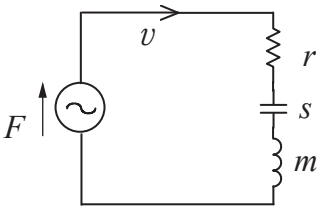
如图所示，将物体 m 挂在弹簧 s 上，施加振动力 F ，物体即会发生振动。此时的振动力 F 和速度 v 的关系是：

$$f = Z_m \cdot v$$

这个 Z_m 是振动系的机械阻抗，由物体的质量 m 、表示弹簧强度的柔量 s （刚度 c 的倒数）、摩擦阻抗 r 构成。这些关系与电气系统中的电压 V 、电流 I 、 R 、 L 、 C 的关系完全相同，相应的电气系统和机械系统如下图所示。



(a)电气系统



(b)机械系统

此外，机械振动系统要素与同等对待的电气系统要素的对应关系如下表所示。

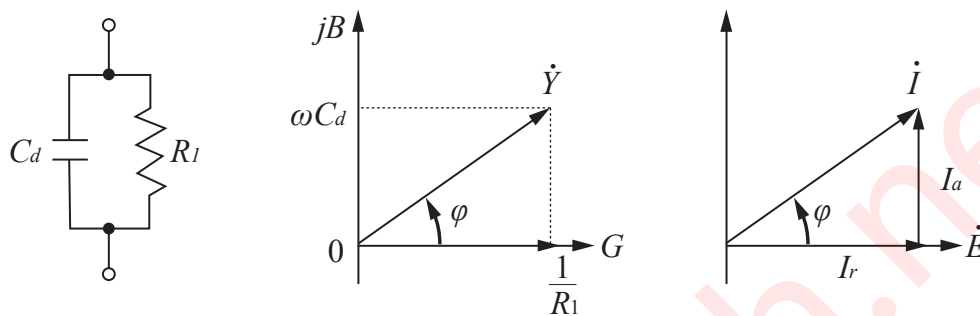
电气系统	电压	电流	电荷	电阻	电感	静电容量	电阻抗	导纳
	V	I	Q	R	L	C	Z	Y
机械系统	力	速度	位移	机械阻力	质量	达标	机械阻抗	机械导纳
	F	v	u	r	m	s	Z_m	Y_m

质量 m 和柔量 s 与电气系统的 L 、 C 相同，是作为运动能量或位置能量积累能量的要素，摩擦阻抗 r 与电气阻抗 R 相同，是消耗能量的要素。

引导以使用压电陶瓷元件

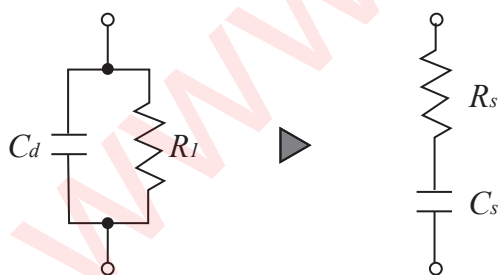
■阻抗匹配

压电陶瓷元件在谐振点会有电容性阻抗，如果电力由振荡器提供时，压电陶瓷元件不能被有效驱动。为获得有效的电力供应，必须以与压电陶瓷元件的电容性电抗相同模数的诱导电抗来抵销压电陶瓷元件的电抗，必须以并联或串联的方式压电陶瓷元件置于振荡回路中。



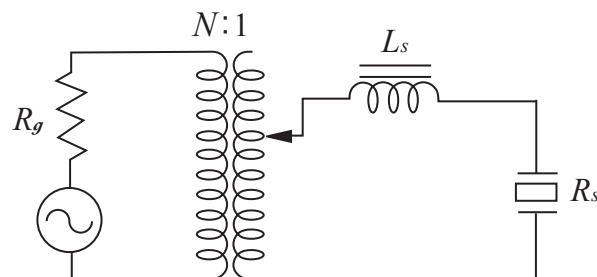
振动子共振时的矢量图

压电陶瓷元件包含等效电路中的 L_1 、 C_1 、 R_1 、 C_d 。但是由于 C_1 、 C_d 被抵销，仅在并联情况下，等效电路会显示 R_1 和 C_d 。元件的电阻抗 Z 就变为 $1/\omega C_d$ 。如与这个电阻抗 Z 的数值相等，元件的阻抗假设就是 R_1 。此外，如假设元件的输出电阻为 R_g ，使 R_g 与 R_1 相等的最有效驱动是可以实现的。这个简单方法需要调整卷线比为 $N:1$ ，此时 $R_g = N^2 R_1$ 。如果负荷大小发生变化， R_1 值也会改变，因为 R_1 与振荡器的机械负荷相对应。比如同样的水负荷就会随着浸入水的方式和气穴现象的产生发生很大的变化。因为，在接近真实运行条件下实测 R_1 值是非常有必要的。一个并联的等效回路可以转变为有 R_s 、 C_s 的串联的回路，此时，将与 $1/\omega C_d$ 的绝对值同样的扼流圈串联，可以与 C_s 抵销。



$$R_s = \frac{R_1}{1 + (\omega C_d R_1)^2} \quad C_s = \frac{1 + (\omega C_d R_1)^2}{(\omega C_d R_1)^2}$$

振动子系统等价变换



振动子阻抗匹配典型电路

引导以使用压电陶瓷元件

■外部施加力的产出计算方法

外部施加力 F 下产生的电荷 Q 或者电压 V 就是一个电能量从机械能量转化的应用。
通用常数比例变化(如压电常数 d_{33} 和 C_d 大小的变化)施加全部外部作用下, 压电陶瓷会对应产生的所有荷电量 Q 。

$$Q = C_d \cdot V = F \cdot d_{33}$$

此时, 输出电压 V 可由压电元件的压电常数 g_{33} 的厚度 t 和断面积 A 的关系表达出来, 具体见下公式。

$$V = \frac{F \cdot d_{33}}{C_d} = \frac{F \cdot g_{33} \cdot t}{A}$$

如果外部施加力 F 是不变, 则荷电量 Q 也是不变。因为一个压电元件荷电量 Q 值与外部施加力 F 是对应的。但是, 因为压电元件(假定是某种电容)的绝缘电阻值是限定的, 实际产生的电量 Q 将被放出, 具体见下表达式。

$$q = Q e^{-t/C_d R} \quad q: \text{实际的表观电荷}$$

因此, 务必知道在应用压电元件于压力感应器等用途时, 是没有静态灵敏度的。

外部施加力 F 可以由质量 m 、加速度 α 、振幅 u , 角频率 ω 和交流电来计算出, 具体如下式:

$$F = m \cdot \alpha = m \cdot u \cdot \omega^2 = m \cdot u \cdot (2\pi f)^2$$

引导以使用压电陶瓷元件

■输入电压 V 对电位移量的计算方法

输入电压对变形能量的驱动有很多应用的实例。在电力输入产生机械力应用实例中，有一个可以在交流电和超声装置下运行，也可在直流电或低频交流电下运行。此时，无负荷下的电位移 u 和产生力 F 变为下列的关系，具体见以下的关系式：

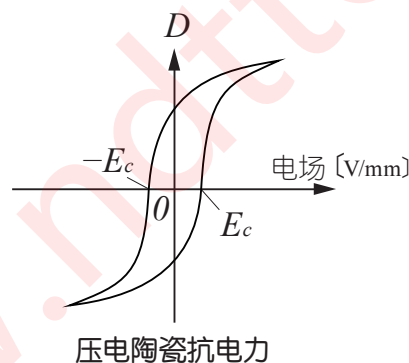
$$u = V \cdot d_{33} \quad V: \text{输入电压、} d_{33}: \text{压电常数}$$

$$F = \frac{u}{S_n} \quad S_n, S_{33}^E: \text{达标}$$

$$S_n = S_{33}^E \cdot \frac{t}{A} \quad t, A: \text{厚度、面积}$$

■抗电力 (抗电场·抗电压)

用高直流电对压电元件进行极化处理，沿着内部自极化方向给定方向，使其发生剩余极化现象，从而得到压电性能。施加与极化方向相反的电压，剩余极化为零时的电场就是抗电力 E_c 。

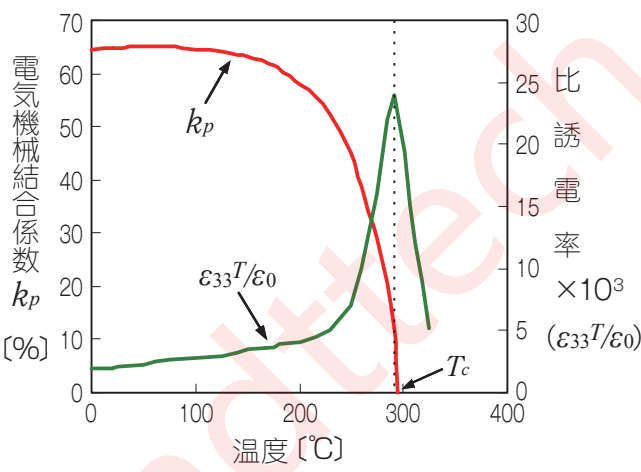


抗电力 E_c 值因压电元件的材料而异，实际使用时，在加强剩余极化的方向，即压电元件的正显示侧施加正电压时，不会发生任何问题，但在正显示侧施加负的高电压时，就需要特别注意。由于剩余极化的消失特性是电压、时间和温度等的函数，因此会根据当时的条件而变化，而对于压电元件的电极之间的厚度，则以几十至几百 V/mm 的电场为限。

引导以使用压电陶瓷元件

■最高使用温度

在一个较低的温度范围内，极化后的压电元件的特性是安全的，不会发生明显变化。但在一个较高的温度范围，其工作温度范围是有限的，这主要是因为晶轴有一个结晶变态点(居里点) T_c 。由于介电常数会无限增加，晶体在居里点变得极不稳定，晶体结构产生相变。由于此时自极化和剩余极化消失，压电现象也将消失。由于剩余极化现象会一直保持消失状态，当温度降至居里点以下时，虽然自极化从压电损失中恢复，但压电性能不能恢复。由于剩余极化消失程度取决于时间，温度，材料，因此不能一概而论。1/2 到 1/3 的居里点温度一般作为连续稳定使用的标准工作温度。



压电陶瓷的高温特性(C-6系列)

■常温时的物理参数

密度	(ρ)	$7.3\sim7.7\times10^3$ [kg/m ²]
线性膨胀率	(α)	$5\sim10\times10^{-6}$ [1/°C]
比热	(C)	$500\sim700$ [J/kg·°C]
导热系数	(k)	$1\sim1.5$ [W/m·°C]
电阻率		$10^{10}\sim10^{11}$ [Ω·m]
抗压强度		$5\sim7\times10^8$ [N/m ²]
抗拉强度		$0.6\sim1\times10^8$ [N/m ²]
抗折强度		$0.6\sim1\times10^8$ [N/m ²]
维氏硬度	(HV)	350~450
纵波声速	(v)	2800~3600 [m/s]

PZT(Pb(Zr·Ti)O₃)的常温物理常数

左表表示压电陶瓷PZT在常温下的一般性物理常数。这些数值将随温度和形状变化而变化，因此详细数据请参照其它文献等。

引导以使用压电陶瓷元件

■实现注意事项

安装压电陶瓷的元件时需要注意电极的处理。

大多数电极是高温烧结的银电极和化学镀金的镍电极。

银电极膜压 $8\mu\text{m}$ 、贴紧强度 $20\text{N}/\text{mm}^2$ 、约相当于3~5B的铅笔硬度，镍电极膜压 $3\mu\text{m}$ 、贴紧强度 $10\text{N}/\text{mm}^2$ 、约相当于3H的铅笔硬度，对实际使用没有妨碍，但因焊接方法、胶粘方法及化学状态，可能发生强度劣化和表面变质，因此需要注意。

●电极的焊接方法

例如，使用 Alunit LFM48 焊锡，建议焊枪尖端温度在 270°C 以下，将焊点控制在最小限度，3秒钟以内短时间作业。

●胶粘方法

将胶粘面进行脱脂处理，涂抹适量的环氧树脂系粘合剂，温度在 80°C 左右以下，边压接边使其凝固。

加热~冷却时会带电，因此尺寸大的元件建议使电极间短路。

●耐化学性和电极的耐环境性

银和镍会与酸、硫化物、卤化物产生化合反应，因此需要注意化学状态。
如下表所示。

状 态	银 电 极	镍 电 极
在 空 气 中	即使在氧气中加热也不会氧化。在臭氧中会变成黑色的过氧化银 Ag_2O_2 。	不易被空气、湿气氧化。
酸 性 溶 液	溶于硫酸、热浓硫酸，会变成 AgNO_3 、 Ag_2SO_4 。	溶于硫酸、硝酸等，变成 NiSO_4 、 $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 。
碱 性 溶 液	银不溶于碱性溶液，但会侵蚀电极所含的玻璃质，发生银膜剥离。	无影响。
硫 化 物	遇硫磺、硫化氢会变成黑色的 Ag_2S 。	化合反应后变成 NiS 。
卤 化 物	化合反应后变成 AgCl 、 AgBr 、 AgI 等。	化合反应后变成 NiCl_2 等。
其 他	在高湿度环境下直流电场长时间加压会发生银迁移（银结晶成长短路现象）。建议进行防湿处理。	在高湿度环境下使用时，最好进行防湿处理。
保 存 方 法	最好避免高温多湿环境，在密封状态下保存。 请不要与橡皮圈和尿烷泡沫等包装在一起。	最好避免高温多湿环境，在密封状态下保存。

引导以使用压电陶瓷元件

■使用注意事项

- 产品的规格会随着产品的改进而变化而且不会事先通知。请在订货前确认产品的最新规格。
- 本目录描述了产品的特性和质量保证，在确保使用该产品前需要您做出实际的评估和确认。
- 目录中的产品仅作一般性描述。如果将产品直接用于人体生命相关或很高要求的场合，请事先加以验证。
- 当第三方知识产权拥有者使用公司的产品所造成的伤害，本公司不承担连带责任。
- 不正确的使用方法可能导致人身伤害或火灾等事故，这与产品的质量和可靠性无关。如果对产品的使用方法有不清楚的地方请和本公司联系。
- 對於那些對應的管制物品按照外匯及外國貿易法的規定，您必鬚根據出口的情況下，法律的出口許可證。
- 未经许可，任何人不得对本目录的内容进行复制或转载。
- 本公司在产品的生产过程中没有使用破坏臭氧层的物质（ODS）。



长沙鹏翔电子科技有限公司

地址：长沙高新区文轩路27号麓谷企业广场A4栋507 邮编：410205
电话：0731-84668116, 85128115, 85128116 传真：0731-84668126
邮箱：sales@ndttech.net 网址：http://www.ndttech.net

区域销售企业QQ

A: 2881036732 E: 2881036736
B: 2881036733 F: 2881036737
C: 2881036734 G: 2881036738
D: 2881036735

