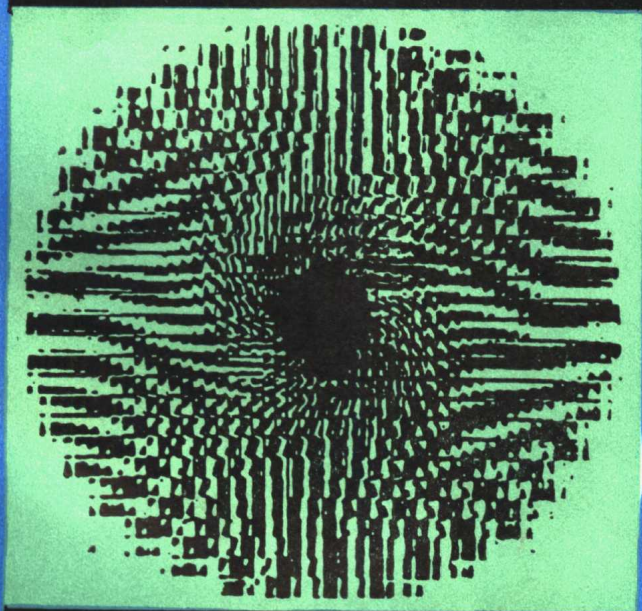


球磨机物料负荷 检测与控制

杨伟政 等编著

中国建筑工业出版社



球磨机物料负荷检测 与 控 制

杨 伟 政 等编著

中国建筑工程出版社

本书概述新型压电陶瓷振动式传感器、变送器结构原理以及利用振动原理检测球磨机物料负荷的方法，讲述自动控制基本原理，介绍具有实用价值的检测指示装置和控制系统，对有关仪器设备的调校与安装也作了具体介绍，内容深入浅出。

本书可供建材、冶金、化工及电厂等企业部门从事粉磨工作的技术人员、操作工及有关专业师生阅读参考，亦可作粉磨培训教材。

球磨机物料负荷检测与控制

杨伟政 等编著

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
北京市平谷县大华山印刷厂印刷

开本：787×1092毫米 1/32 印张：4⁵/₈ 插页：2 字数：103千字

1987年9月第一版 1987年9月第一次印刷

印数：1—3,610册 定价：0.88元

统一书号：15040·5264

前 言

球磨机物料负荷检测与控制的目的是在确保粉磨产品细度质量指标合格的前提下，使磨内物料填充率保持较佳值，提高粉磨效率，获得较高产量和降低电耗。

目前，国内外一般采用电耳（扬声器，国外亦称麦克风）作传感器，或采用提升机电机电功率传感器，检测球磨机的物料负荷，并由此组成自控系统。由于电耳抗干扰能力差，安装困难，提升机电机功率变化不明显，检测信号失真大，滞后现象严重，故效果均不甚理想，因而球磨机物料负荷的检测与控制成了粉磨工作者的重要研究课题之一。

在对我国水泥、陶瓷等建材企业和冶金、电厂的球磨机运行现状进行调研的基础上，我们从1982年初开始研制新型的振动式压电陶瓷传感器、振动式变送器及球磨机物料负荷检测指示装置和控制系统。负责这项研制工作的是孙兆森、邢庆瑞和杨伟政。刘希民也参加了部分研制工作，王元东和杨峰明参加了振动式变送器的调试工作。

振动式压电陶瓷传感器和变送器样机于1983年7月和1984年7月分别由山东计量科学研究所和北京市计量局测试鉴定。球磨机物料负荷检测与控制系统由山东省、淄博市科委于1985年12月组织进行了技术成果鉴定，且由淄博市无线电厂生产。

经过五个水泥厂、一个铝厂近两年时间的工业运行试验表明，球磨机采用了振动式传感器、变送器作物料负荷检测

指示和自控系统后,台时产量可提高8%左右,生产每吨水泥的电耗下降接近8%,这对于水泥厂及使用球磨机的企业,全年总累计产量的提高和电能的节约将是一个可贵的数字,同时改善了磨机操作人员的工作条件,看磨工“十磨九聋”的老大难问题可望得到解决,因而具有较明显的经济效益和社会效益。目前已有近30个厂应用了该项技术。

我们希望这一新技术通过本书的出版得到更广泛的应用,为建材、冶金工业及粉磨技术现代化作出微薄贡献。本书仅围绕压电陶瓷传感器及变送器在球磨机物料负荷的检测和控制方面作了初步论述和探讨,不再提及其它检测手段和控制。为了便于一般技术人员和操作人员阅读,对自控原理专门作了概述,对有关问题除了讲述其物理过程外,还作了一定深度的定量分析,尽量做到深入浅出,希望能满足不同水平读者的要求。

本书第1章由孙兆森、刘希民编写,第2章由邢庆瑞编写,第3至8章由杨伟政编写。全书由杨伟政主编统稿。限于作者水平,谬误之处请读者批评指正。

山东建筑材料工业学院 杨伟政

一九八六年十一月

目 录

前 言

1. 压电陶瓷振动式传感器	1
1-1 压电效应和压电陶瓷	1
1-1-1 压电效应	1
1-1-2 压电陶瓷	2
1-2 YTC传感器	3
1-2-1 结构	3
1-2-2 主要参数及测试结果	3
1-3 检测原理	6
1-4 应用价值	8
2. DBZ型振动式变送器	12
2-1 技术指标和原理	12
2-1-1 主要技术指标	12
2-1-2 电路分析	13
2-2 误差分析	17
2-2-1 测试数据	17
2-2-2 线性误差	18
2-2-3 非线性误差	22
3. 物料负荷指示装置	26
3-1 装置的组成	26
3-2 传感器的检验与安装	28

3-2-1 检验.....	23
3-2-2 安装.....	30
3-3 变送器的校验与安装.....	31
3-3-1 校验.....	31
3-3-2 安装.....	34
3-4 指示器的校验	34
3-5 投运注意事项	37
4. 自动控制系统的基本概念	40
4-1 自动控制系统	40
4-1-1 反馈控制.....	40
4-1-2 自控系统中所用术语的意义.....	42
4-1-3 自控系统的类型.....	46
4-2 框图与传递函数	48
4-2-1 方框图.....	48
4-2-2 传递函数的简单列写法.....	48
4-2-3 框图变换.....	52
4-3 自控系统的品质指标	56
4-4 调节对象的特性	57
4-5 调节规律.....	61
5. 单回路反馈调节系统.....	68
5-1 系统组成及分析	68
5-1-1 工艺流程.....	68
5-1-2 系统的组成.....	69
5-1-3 广义对象动态特性的求取.....	72
5-1-4 调节器的参数整定.....	75
5-1-5 系统特性分析.....	78

5-2 调节器的校验	86
5-2-1 DTL-121型调节器	86
5-2-2 校验	89
5-3 电流—电压转换器	93
5-4 电磁振动给料机及其安装调试	95
5-4-1 给料机	95
5-4-2 安装	97
5-4-3 控制器	99
5-5 系统接线	101
5-6 系统的投运	104
6. 前馈—反馈复合调节系统	107
6-1 系统的组成	107
6-2 前馈调节器参数的整定	109
6-3 冲击式物料流量计及其安装和校验	112
6-3-1 结构原理	112
6-3-2 主要技术指标	116
6-3-3 安装	116
6-3-4 校验	117
6-4 系统的投运	118
7. 串级调节系统	119
7-1 恒速式电子皮带秤给料机串级调节系统	119
7-1-1 恒速式电子皮带秤给料机	119
7-1-2 系统的组成	122
7-1-3 参数整定和投运	124
7-2 调速式电子皮带秤给料机串级调节系统	125
8. 应用举例	129

8-1	山东省张店铝厂 (501厂)	129
8-2	博山水泥厂	132
8-3	白马山水泥厂	134
8-4	黄县水泥厂	136
8-5	存在的问题	137
主要参考书目		138

1. 压电陶瓷振动式传感器

1-1 压电效应和压电陶瓷

1-1-1 压电效应

当晶体受应力 T 作用产生形变 S 时, 晶体产生额外的电荷, 这种现象称为压电效应, 又称作正压电效应。反之, 当晶体受外加电场 E 作用时, 晶体产生形变 S , 称为逆压电效应。对于正压电效应, 用介质电位移 D (单位面积的电荷) 和应力 T 表达如下

$$D = \frac{Q}{A} = dT \quad (1-1)$$

式中 Q ——电荷 (C);
 A ——面积 (m^2);
 d ——压电常数 (m/V)。

对于逆压电效应, 用应变 S 和外加电场 E 表达如下

$$S = dE \quad (1-2)$$

对于正逆压电效应, 压电常数 d 在数值上相同。

压电性能还可以用压电常数 g 表示, 其物理意义是每牛顿应力所产生的电场强度, 单位是 $m \cdot V/N$ 。压电常数 d 与 g 的关系由电工量之间的关系导出

$$g = \frac{d}{k\epsilon_0} \quad (1-3)$$

式中 k ——相对介电常数；

ϵ_0 ——自由空间介电常数 ($\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$)。

由以上公式可见，通过压电效应把力学量（应力 T 和应变 S ）与电学量（电场 E 和电位移 D ）互相连系在一起，这称为机电耦合。机电耦合系数 k 是压电效应的一个重要参数，其数值为

$$k^2 = \frac{\text{电能转变的机械能}}{\text{输入电能}} \quad (1-4)$$

或

$$k^2 = \frac{\text{机械能转变的电能}}{\text{输入机械能}} \quad (1-5)$$

由于这种转换是不完全的，所以 $k^2 < 1$ ，即有 $k < 1$ ， k 是无量纲的。

1-1-2 压电陶瓷

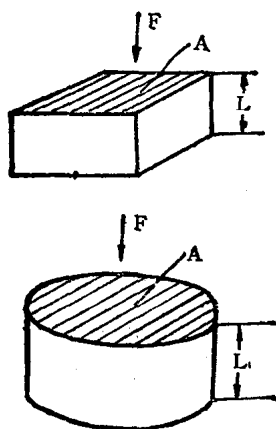


图 1-1 压电陶瓷元件

压电效应的实际应用是在 1947 年测定了多晶钛酸钡 BaTiO_3 的压电性能后才开始的，1954 年发现了性能更为优良的锆钛酸铅 $\text{Pb}(\text{TiZr})\text{O}_3$ 。钛酸钡、锆钛酸铅是用类似制造陶瓷的方法制造出来的，所以称作压电陶瓷材料。

截面积为 A 、厚度为 L 的矩形或圆形压电陶瓷元件如图 1-1 所示。若垂直于截面施加作用力 F ，则在两电极间产生的电压为

$$U = g \frac{F}{A} L \quad (1-6)$$

式中 U ——电压 (V) ;
 A ——截面积 (m^2) ;
 L ——厚度 (m) 。

式 (1-6) 表达压电陶瓷的正压电效应, 压电陶瓷都有逆压电效应。

以 PbTiO_3 - PbZrO_3 为主要成份的锆钛酸铅压电陶瓷材料具有较高的压电常数和机电耦合系数, 换能效率高, 性能稳定, 可以在潮湿、寒冷、强磁及辐射等恶劣条件下使用。在 YTC 型压电陶瓷振动式传感器中, 采用了机电耦合系数为 0.5~0.7 的锆钛酸铅压电陶瓷材料作为传感元件, 工作于正压电效应。

1-2 YTC 传 感 器

1-2-1 结构

YTC 压电陶瓷振动式传感器 (简称 YTC), 由压电陶瓷片、印刷线路板、弹簧片、输出信号插座及壳体组成, 其外形和结构分别见图 1-2 和图 1-3。交流毫伏信号由压电陶瓷两极引出, 接在输出插座上。壳体由铸铝制成, 为现场安装式, 整个传感器密封性好, 能有效防水、防尘, 因而可适应环境恶劣的工作场合。

1-2-2 主要参数及测试结果

1. 性能指标

非线性: $\leq 0.3 \text{ mV/g}$ (测试频率 $f = 650 \text{ Hz}$);

灵敏度: 33.4 mV/g (测试频率 $f = 650 \text{ Hz}$);

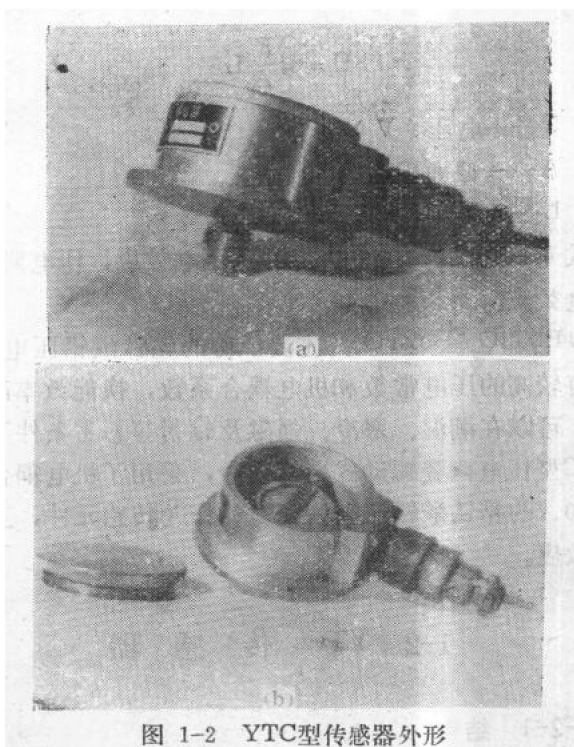


图 1-2 YTC型传感器外形

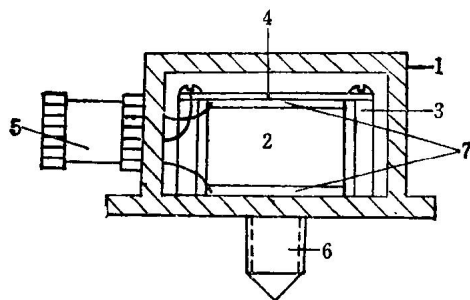


图 1-3 YTC型传感器结构

1—壳体；2—压电陶瓷块；3—紧固螺丝；4—弹簧片；5—接插座；6—螺栓；7—印刷电路板

能承受最大加速度: 10g;

使用环境温度: $\leq 50^{\circ}\text{C}$;

压电陶瓷元件规格: $\phi 24 \times 10\text{mm}$ 。

2. 测试结果

保持频率不变, 振动加速度 g 变化时, YTC传感器输出如表1-1所示。

YTC传感器输出特性($f=650\text{Hz}$)

表 1-1

输入 (g)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
输出 (mV)	22.2	42.1	62	82	103	123	142	163	183	204					300

由表1-1可见, YTC传感器输出与振动加速度成线性关系。

保持振动加速度不变, 振动频率变化时, YTC传感器输出如表1-2所示。

频率对YTC输出的影响(加速度=1g)

表 1-2

频率 (f)	300	500	600	700	1000
输出 (mV)	21.4	21.5	21.8	22.2	22.8

由表1-2可见, 频率在一定范围内变化时, YTC传感器输出变化很小。

YTC传感器对振动加速度变化敏感且为线性关系, 而频率变化对YTC传感器输出几乎没有影响, 这对检测磨机负荷是非常有利的。

1-3 检 测 原 理

球磨机运转时，研磨体（钢球等）和物料偏于磨机的一侧，并不断地滚滑和下落，冲击研磨物料。磨机的转动部分处于严重不平衡状态，造成不均衡的离心力，使磨机系统振动。在磨机转速不变时振动与物料的多少相关，检测出磨机振动强度就可间接反映出磨机物料负荷情况。磨机振动强度的检测，实质上是测量磨机系统的振动加速度。YTC传感器测量磨机加速度原理如图1-4所示。

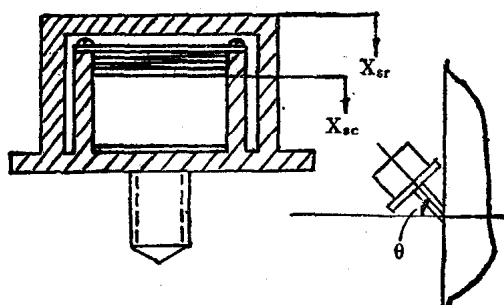


图 1-4 YTC测加速度原理图

设 X_{sr} 为YTC壳体相对惯性空间的位移， X_{sc} 是压电陶瓷质量 m 相对惯性空间的位移， $y = X_{sc} - X_{sr}$ 是压电陶瓷块相对壳体的位移。根据牛顿定律，可列出系统的运动方程式

$$\begin{aligned} m\ddot{X}_{sc} + f(\dot{X}_{sc} - \dot{X}_{sr}) + k(X_{sc} - X_{sr}) \\ = mg\sin\theta = 0 \end{aligned} \quad (1-7)$$

式中 m ——压电陶瓷块质量（kg），
 f ——粘性摩擦系数（N·S/m），

k ——弹簧片刚度 (N/m) ;

θ ——被测装置与水平线所成夹角, 在测量中 θ 为常数;

$\dot{X}_{sc}$ ——是压电陶瓷质量 m 相对惯性空间的位移速度 (一阶导数);

$\ddot{X}_{sc}$ ——是压电陶瓷质量 m 相对惯性空间的位移加速度 (二阶导数)。

上式还可写成

$$m\ddot{y} + f\dot{y} + ky = -m\ddot{X}_{sr} + mg\sin\theta \quad (1-8)$$

式中 $\dot{y}$ ——是压电陶瓷块相对壳体的位移速度 (一阶导数);

$\ddot{y}$ ——是压电陶瓷块相对壳体的位移加速度 (二阶导数)。

为便于说明问题, 设

$$Z = y - \frac{mg}{k}\sin\theta \quad (1-9)$$

则方程为

$$m\ddot{Z} + f\dot{Z} + kZ = -m\ddot{X}_{sr} \quad (1-10)$$

如果把输入加速度 $\ddot{X}_{sr}$ 视为系统的输入量, Z 作为系统的输出量, 并设 $t=0$ 时初始值为零, 则传递函数为

$$\frac{Z(S)}{S^2 \ddot{X}_{sr}(S)} = -\frac{1}{S^2 + \frac{f}{m}S + \frac{k}{m}} \quad (1-11)$$

当输入信号频率比自由振荡角频率 $\sqrt{\frac{k}{m}}$ 低很多时, 传

递函数可近似地表示为

$$\frac{Z(S)}{S^2 \ddot{X}_{sr}(S)} = -\frac{m}{k} \quad (1-12)$$

或

$$\ddot{x}_{sr} = -\frac{k}{m} (y - mg \sin \theta) \quad (1-13)$$

将上式两边同乘 m 得

$$m \ddot{x}_{sr} = -ky - km g \sin \theta \quad (1-14)$$

式(1-14)说明弹性体所受的力比例子弹性体(除弹簧片外,压电陶瓷也是弹性体,不过刚度很大)的恢复力,这个力直接作用在压电陶瓷上。

根据压电陶瓷的性质有

$$U = g \frac{F}{A} L = g m \ddot{x}_{sr} \frac{L}{S} \quad (1-15)$$

由式(1-15)可知,当压电陶瓷的几何尺寸一定时,其输出电压与磨机的振动加速度成正比。

磨机筒体振动通过刚体传递到轴承座,只要将YTC传感器安装在轴承座上即可检测其振动。磨机物料负荷大(磨内物料多),由于物料的垫衬阻尼作用,磨机振动小,加速度 $\ddot{x}_{sr}$ 小,传感器输出小。反之,加速度 $\ddot{x}_{sr}$ 大,传感器输出大。传感器输出与磨机物料负荷成反比关系。

1-4 应 用 价 值

在水泥生产中,物料的粉磨过程耗电量最大,估计占总耗电量的75%,因此如果将球磨机在粉磨过程中的耗电量减少百分之几,就可获得到很高的经济效益。实验表明,磨机在最佳填充量运行时,产量最高、耗电最少,如图1-5的曲线所示。为了适应物料易磨性的变化,操作工人一般都在低于磨机最佳负荷的5~10%下进行操作,这样做虽然保证