

· 系统与装置 ·

便携式结晶器振动监测系统的设计与应用

谢志江¹, 吴 勇¹, 刘利云¹, 任 铮¹, 欧阳奇²

(1. 重庆大学 机械工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆大学)

摘要:根据炼钢连铸结晶器的特点,设计并实现了便携式结晶器振动监测系统。系统实现了三维振动动画模型的建立、振动频率辨识与计算、振动相位计算、振动幅值及偏差计算和相关工艺参数计算。经过在炼钢厂的现场应用,系统设计满足工业现场的使用要求,能精确地测量结晶器的振动幅值、频率、相位和相关工艺参数,为结晶器的安全生产提供了科学依据,有较好的工程应用价值。

关键词:连铸;结晶器;振动;便携式

中图分类号: TF341.6 **文献标志码:** B **文章编号:** 1000-7059(2009)01-0035-04

Design and application of a portable mould vibration monitoring system

XIE Zhi-jiang, WU Yong, LIU Li-yun, REN Zheng, OUYANG Qi

(College of Mechanical engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: According to features of mould in steelmaking continuous casting, a portable mould vibration monitoring system was designed and achieved. Functions of the system include construction of 3-D vibration animation model, identification and calculation of vibration frequency, calculation of vibration phase, calculation of amplitude and deviation, and calculation of process parameters. The system has been put into operation in steelmaking plant. Design of the system can meet the need of industrial field application. It can precisely measure amplitude, frequency and phase of vibration of mould, provides a scientific basis for safety production of mould, and has better engineering value.

Key words: continuous casting; mould; vibration; portable

0 引言

某炼钢厂年产转炉钢超过 600 万 t,拥有两条连铸生产线。由于生产任务紧,设备检修时间有限,对设备正常生产的可靠性就提出了更高的要求。1[#]和 2[#]方坯连铸结晶器由于缺乏振动监测系统,每次维修都只能在结晶器上放一盆水,通过观察水的波动情况来判断检修后结晶器的振动情况,以至于现场技术人员对生产也不能有十分的把握。当铸坯出现质量问题时,无法判定问题产生原因。因此,该炼钢厂于 2006 年与重庆大学合作开发了便携式结晶器振动监测系统。该系统自投入应用以来,在该厂结晶器的定检与大修中发挥了极大的作用,能准确地监测结晶器的振幅、频

率、相位和工艺参数,为检修后的正常生产提供了科学依据。

1 系统总体设计

结晶器振动状态监测分析系统由位移传感器、传感器固定架、安装装置、信号传输电缆、信号采集盒、便携式电脑、系统功能软件包等软硬件组成^[1]。系统总体结构如图 1 所示。

2 系统软件设计中的关键技术

结晶器振动状态监测分析系统的软件设计和开发借鉴了国内外相关系统的成功之处,使用了若干软件开发的新技术,引进工控组态软件的思想,对系统总体功能进行了详细规划和设计。系统软件具有振动三维动画显示、振动频率辨识与

收稿日期: 2008-06-03; 修改稿收到日期: 2008-09-17

作者简介: 谢志江 (1963-), 男, 湖南湘乡人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事动态信号分析处理与设备故障诊断的研究。

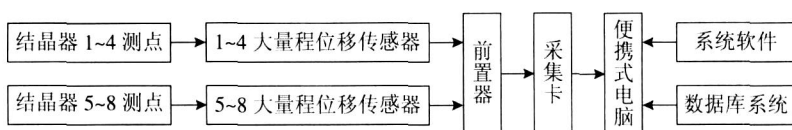


图 1 系统构成框图

Fig. 1 System constitution diagram

计算、振动相位计算、幅值及偏差计算和工艺参数计算等功能。

2.1 三维振动动画显示

把结晶器抽象为一个立方体,立方体的 8 个角分别代表结晶器的 8 个角,如图 2 所示。

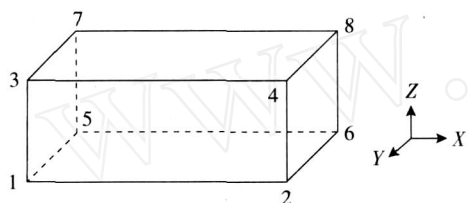


图 2 结晶器的立方图

Fig. 2 Cube chart of mould

利用对结晶器 8 个测点同步采集的振动波形,包括 Z 向左上角、Z 向右上角、Z 向左下角、Z 向右下角、左侧 X 方向、左侧 Y 方向、右侧 X 方向、右侧 Y 方向,每次分别取 8 个测点的相应位移值,按规定的坐标赋给对应的顶点,由此来构建三维振动的动画模型。

2.2 振动频率辨识与计算

系统采用时域信号过零点判别法计算振动频率。设垂直方向 Z 的振动频率为 f , 振动周期为 T , 数据采集频率为 F , 采集间隔为 Δt , 垂直方向 Z 相邻两次振幅的正变负 (或负变正) 之间的采集次数为 n , 则:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{n \times \Delta t} = \frac{F}{n}$$

为保证在不同拉速下都能检测到高精度的结晶器振动频率 f , 应选择适当的采集频率。F 太低将影响 f 在低频段的精度和计算速度, 太高将会影响 f 在高频段的稳定性。

假设有振幅负变正的采样点值为 X_i, X_{i+1} , 其中 $X_i < 0, X_{i+1} > 0$; 其相邻的下次振幅负变正的采样点值为 X_j, X_{j+1} , 其中 $X_j < 0, X_{j+1} > 0$ 。由于采样间隔一般不为振动周期的整数倍, 因此如果取 $n = j - i$, 必然带来误差。通常采样频率都比较高, 而结晶器振动的频率非常低, 所以 Δt 非常小, 这

就意味着在 $i, i+1$ 以及 $j, j+1$ 之间的极小局部可以认为正弦波是线性的, 因此采用线性插值来精确确定 n , 其方法如下:

$$i' = i + \frac{X_i}{X_{i+1} - X_i}, \quad j' = j + \frac{X_j}{X_{j+1} - X_j}$$

式中, i', j' 分别为 X_i, X_{i+1} 和 X_j, X_{j+1} 通过线性插值得到的过零点, 再取 $n = j' - i'$ 。

2.3 振动相位计算

理想状态下, 结晶器内外弧振动机构产生的正弦振动应具有相同频率和相位。相位分析是结晶器振动分析的重要内容, 不仅可直观看到结晶器振动时的 4 角同步性误差, 还可以分析结晶器及振动台的振型。如果两侧振动机构存在相差, 那么测得的两侧振动信号间将存在一定的平移。

计算垂直测点 Z_i 与 Z_j ($i, j = 1, 2, \dots, 4$) 振动频率的相位差与计算振频类似, 需要先找到垂直测点的正变负 (或负变正) 过零点。设 α_{ij} 为 Z_j 相对于 Z_i 的相位差 ($^\circ$); n_{ij} 为 Z_j 与 Z_i 时间上最靠近的两个过零点之间的采集点数差, 则有:

$$\alpha_{ij} = 360 \times f \times n_{ij} \times \Delta t = \frac{360 \times f \times n_{ij}}{F}$$

显然, $\alpha_{ij} = -\alpha_{ji}, \alpha_{ii} = 0$ 。所测振动频率 f 的精度与采集频率 F 的选择对 α_{ij} 的计算精度有直接影响。

2.4 幅值及偏差计算^[2]

在信号幅值上进行的各种处理称作幅域分析。信号的简单幅域参数包括均值、最大值、最小值、均方根值、峰峰值等。峰峰值是反映结晶器振动状态的一个重要参数, 也是设定结晶器振动波形的一个必要参数。峰峰值的数学定义如下, 设信号 $x(t)$ 为采样所得的一组离散数据 $x_1, x_2, \dots, x_N$, 若信号最大值 $X_{\max} = \max\{x_i\}$, 信号最小值 $X_{\min} = \min\{x_i\}$, 则信号峰峰值 $X_{p-p} = X_{\max} - X_{\min}$ 。这是最常用的峰峰值的求法, 这种求法的最大弊端是不能抑制信号中的干扰信号。信号中一些非振动特征的偶然波动对峰峰值影响很大, 使其不能反映结晶器振动状态的真实峰峰值。

在求峰峰值的过程中, 引入滑动平均, 很好地

改善了这个问题。滑动平均也叫移动平均,对于一个给定信号的离散数列,首先设定一个固定的 k 值(至少应大于一个周期的采样点数),分别计算第 1 项到第 k 项的峰峰值,第 2 项到第 $k+1$ 项峰峰值,第 3 项到第 $k+2$ 项峰峰值等等,直到数列的尾部,再用所有局部峰峰值的平均值作为该信号的峰峰值。

A_0 为垂直方向测点 Z_i 的振幅设计值,实测振动峰峰值为 X_{p-pi} ,实测振幅为:

$$A_i = X_{p-pi} / 2$$

垂直方向振幅偏差为:

$$\Delta A_i = A_i - A_{0i}$$

水平窜动偏差值就是水平振动幅值的最大实测值。

2.5 工艺参数计算^[3-4]

描述结晶器的各项工艺参数对产品质量至关重要,在系统中,根据用户输入的结晶器拉坯速度 V_c (m/min) 和结晶器实际振动波形来计算其实际生产中的工艺参数,以使用户合理地调整参数优化生产。

设结晶器 4 个角正弦振动的幅值为: A_1, A_2, A_3, A_4 , 结晶器 4 个角正弦振动的频率为: f_1, f_2, f_3, f_4 , 结晶器的振幅 (mm) 和频率 (次/min) 均取其平均值: $A = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 A_i, f = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 f_i$, 结晶器振动行程 $h = 2A$ 。则负滑动时间 t_N 为:

$$t_N = \frac{60}{\pi f} \arccos \left(\frac{1000V_c}{\pi f h} \right)$$

负滑动时间比为:

$$T_{NSR} = \frac{2}{\pi} \cdot \arccos \left(\frac{1000V_c}{\pi f h} \right) \times 100\%$$

负滑动率为: $R_{NS} = \left(1 - \frac{2fh}{1000V_c} \right) \times 100\%$

3 系统现场应用

3.1 结晶器振动的测试过程

结晶器振动空车测试安排在定修后开浇前的时间进行,所选择的试验流道是炼钢厂 1[#] 方坯连铸机的第 6 流。其传感器的布置见图 3,由左上、右上、左下、右下 4 个传感器分别测量振动台上 4 个点在垂直方向 (Z 方向) 的位移,也就是振幅;右下和右上布置了 4 个传感器,两个用来测量振动台沿铸流方向 (Y 方向) 的位移,另外两个则用来测量振动台与铸流垂直方向 (X 方向) 的位移,也即偏振。

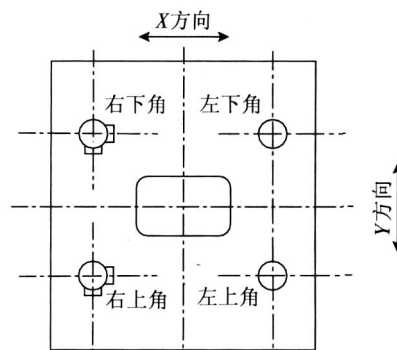


图 3 传感器布置

Fig. 3 Layout of sensors

结晶器振动测试内容包括:频率 $f = 53 + 66V_c$ 、行程 $h = 4 + 2V_c$ 、波形偏斜率 $\alpha = 0$ 正弦振动时的空车测试,以及拉速 V_c 分别为 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 1.0 m/min 时的数据和波形采集。

3.2 测试结果与分析

经过测试,由便携式结晶器振动监测系统得到表 1~4 的测试数据,其结果与分析如下。

结晶器空车振动幅值的测试数据见表 1。测试数据中振动台右边内弧侧的值比左边内弧侧的值略大,振动台左边外弧侧的值比右边外弧侧的值略大。这些差值由两个原因产生,一是各传感器在振动台安装位置不同,对于弧形连铸机来说,振动台上每一点的振幅是不同的,传感器的安装位置的差别带来振幅的差别;另一个原因是测量误差引起的。

表 1 结晶器空车振动幅值的测试数据

Table 1 Vibration amplitude test data of the continuous casting mould unloaded

方向	拉速 / (m/min)				
	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0
Z 左上	3.147 9	3.231 8	3.352 0	3.462 2	3.737 6
Z 右上	3.241 4	3.339 0	3.415 3	3.531 2	3.817 4
Z 右下	3.673 2	3.775 0	3.879 9	4.034 4	4.340 0
Z 左下	3.699 1	3.820 8	3.973 4	4.110 7	4.451 4
Y 负向	0.028 9	0.031 8	0.030 2	0.024 5	0.028 6
X 负向	0.029 1	0.031 6	0.029 4	0.023 9	0.028 2
Y 正向	0.872 6	0.812 6	0.912 2	0.912 1	0.798 9
X 正向	0.032 8	0.031 0	0.031 4	0.026 3	0.032 1

结晶器空车振动频率的测试数据见表 2。表 2 中结晶器在各拉速下的频率测量误差分别为 0.041, 0.007, 0.839, 0.167 和 1.353 Hz。其中拉速为 0.7 m/min 和 1.0 m/min 时的误差稍大。振动时,低拉速条件下结晶器能以较高的精度反映控制台的设定频率。因此要使该流结晶器在较高

的频率精度下生产时,应避免采用较高的拉速。

表 2 结晶器空车振动频率的测试数据

Table 2 Vibration frequency test data of the continuous casting mould unloaded

类别	拉速 / (m/min)				
	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0
设定值	86.0	92.6	99.2	105.8	119.0
实测值	85.959	92.593	98.361	105.633	117.647
差值	0.041	0.007	0.839	0.167	1.353

结晶器空车振动各个测点的平均相位差数据见表 3。表 3 中结晶器各测点的相位差大部分都在 1 以内,相对误差在 $1/360 = 0.27\%$ 以内,故结晶器 4 个测点振动的同步性较好。

同时,从表 3 也可以看出,拉速为 0.7 m/min 时振动的相位差较大,所以为了保证该流结晶器 4 个角振动的同步性,应该尽量避免使用该拉速或者对该拉速进行优化。该流结晶器右下角的相位差较其他点大,下次检修设备时应重点关注。

表 3 结晶器空车振动各个测点的平均相位差数据

Table 3 Average phase difference test data of the continuous casting mould vibration unloaded

测点	拉速 / (m/min)				
	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0
Z 向左上角	0.472 2	0.646 3	1.000 3	0.677 9	0.362 0
Z 向右上角	0.769 6	0.646 3	1.438 0	0.677 9	0.445 8
Z 向左下角	0.472 2	0.708 8	1.000 3	0.874 5	0.362 0
Z 向右下角	0.818 7	1.769 8	1.672 4	0.912 7	0.554 2

结晶器空车振动各拉速下的工艺参数数据见表 4。表 4 中负滑动时间与负滑动时间比都随着拉速的提高而减小,负滑动率随着拉速的提高而增大。因此,当某钢种需要较小的负滑动时间和较大的负滑动率时,应提高拉速。由于该表所得数据来源于结晶器空车振动,所以对于生产只具有参考意义,不具有指导意义。

4 结束语

便携式结晶器振动监测系统软件的设计过程中,充分考虑了信号离散采样的各种不利因素。

表 4 结晶器空车振动各拉速下的工艺参数数据

Table 4 Process parameters data of the continuous casting mould vibration unloaded

工艺参数	拉速 / (m/min)				
	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0
负滑动时间 t_N / s	0.288 5	0.263 1	0.243 8	0.225 4	0.200 2
负滑动时间比 T_{NSR} / %	82.66	81.19	79.94	79.37	78.52
负滑动率 R_{NS} / %	-18.29	-9.33	-2.68	0.05	3.84

利用线性插值法消除了频率计算的误差,采用滑动平均抑制了信号中一些非振动特征的偶然波动对峰峰值的影响。该系统于 2007 年 4 月投入应用,系统的设计满足工业现场的使用要求,能精确地测量结晶器的振动幅值、频率和相位,为结晶器的安全生产提供了科学的依据,有较好的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 陈志新, 阎 瑾, 赵友军, 等. 板坯结晶器振动状态在线监测系统设计与实现 [J]. 冶金自动化, 2001, 25(2): 20-24.
CHEN Zhi-xin, YAN Jin, ZHAO You-jun, et al. Design and realization for an on-line oscillation monitoring system of the slab caster mold [J]. Metallurgical Industry Automation, 2001, 25(2): 20-24.
- [2] 杨文志, 苏凤岐, 陈宏杰. 太钢不锈钢厂连铸机结晶器振动测试及分析 [J]. 包头钢铁学院学报, 2003, 22(1): 59-62.
YANG Wen-zhi, SU Feng-qi, CHEN Hong-jie. The vibration test and analysis of continuous mould crystal device in steelmaking plant of stainless steel of Taiyuan Iron and Steel Co. [J]. Journal of Baotou University of Iron and Steel Technology, 2003, 22(1): 59-62.
- [3] 陆哲时. 连铸结晶器振动装置在线监测系统的设计与研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [4] 林会明. 连铸机结晶器振动测试分析 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2005. [编辑: 夏 宁]

(上接第 30 页)

车位置跟踪技术对于每块台车进行从上料至机尾全过程的数据跟踪,从而为建立终点温度模型提供准确参数。另外,虽然在点火器前可检测到料层厚度数据,但其滞后时间大约为 1.5 min,同时与台车机速相关,传统的控制方法已不能实现对其进行自

动控制,因此利用系统的建模优势实现了料层自动控制。

参考文献:

- [1] 傅菊英. 烧结球团学 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 1996: 102. [编辑: 魏 方]