

# 全自动提拉单晶炉系统控制技术

李金,何 晔,余建军,付昌禄,宋晓佳,母江东,邓 力,何根华,陈川贵

(中国电子科技集团公司第26研究所,重庆 400060)

**摘 要:**详细阐述了一种全新单晶炉自动控制系统,该系统采用工业控制计算机为数据控制核心,上称重控制传感器进行晶体数据采集,利用感应加热或电阻加热方式控制单晶炉温场。通过对单晶炉控制系统特性研究和热场模型的正确推导,有效解决了系统温场及晶体结晶过程中引发的大滞后及系统非线性控制问题。试验结果表明,该系统控制稳定可靠,各项性能指标均达到国际先进水平。

**关键词:**晶体生长;单晶炉;上称重

**中图分类号:**TM22;TN804

**文献标识码:**A

## Study on the Control Technique of Full-Automatic Crystal Furnace

LI Jing, HE Ye, SHE Jianjun, FU Changlu, SONG Xiaojia, MU Jiangdong, DENG Li,

HE Genghua, CHEN Chuangui

(26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

**Abstract:** The control principle of the full-automatic crystal furnace for Czochralski method has been introduced. The crystal furnace system uses the weighing feedback control technique. By setting various parameters and using the industrial computer as the control core, the full-automatic crystal furnace can shield the external disturbance effectively and realize the crystal externality control with high accuracy.

**Key words:** crystal growth; furnace; up-weighing; interface inversion; flowchart

### 0 引言

人工生长晶体的方法有很多,其中提拉法<sup>[1]</sup>应用最广泛,且在技术上最成熟。由于提拉法单晶炉晶体生长过程中需保持结晶面温场相对稳定,其生长过程易受温度、转速、温场设计、气氛环境及冷却系统影响,目前国内提拉法晶体生长设备基本采用手动或半自动控制方式,此类系统操作复杂,易受人为因素影响,系统工艺重复性差,目前全自动设备基本靠进口,价格贵,系统界面复杂,可操作性差。本文简单阐述了我所自主研发全自动提拉法控制系统的特点及其应用优势。

### 1 提拉原理简介

1918年,Czochralski首先提出提拉法,目前是熔体生长最常用的方法之一<sup>[2]</sup>。近年来此方法得到了几项重大改进,能顺利地生长某些易挥发的化合物(如GaP和含Pb的化合物)和特殊形状的晶体。提拉法生长示意图如图1所示。

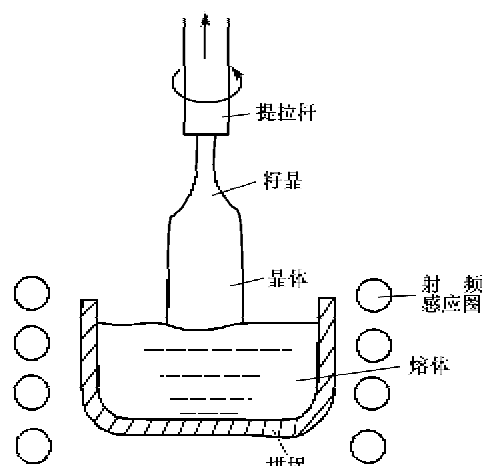


图1 提拉法生长示意图

将预先合成好的多晶原料放入坩埚中,并将其加热到原料的熔点以上,此时坩埚中的原料融化成熔体。在坩埚的上方有一根可旋转和升降的提拉杆,杆下端的籽晶夹头中装有籽晶,降低提拉杆,使籽晶接入熔体中,只要温度合适,籽晶既不熔化也不

收稿日期:2012-07-23

作者简介:李金(1982-),男,湖南岳阳人,工程师,主要从事晶体生长控制系统的研究。

长大;缓慢地向上提拉和转动籽晶杆,同时缓慢降低加热功率,籽晶就逐渐长粗。根据外围反馈小心地调节加热功率,控制晶体的结晶速率,就能得到所需直径的晶体。

这种方法主要优点<sup>[3]</sup>如下:

1) 在生长过程中可方便地观察晶体的生长情况。

2) 晶体在熔体表面处生长,而不与坩埚相接触,这样能显著减小晶体的应力,并防止坩埚壁的寄生成核。

3) 可方便地使用定向籽晶和缩颈工艺。

## 2 全自动单晶炉设计组成

### 2.1 直径控制及原理

单晶炉系统作为高精度控温型系统,其系统特点体现在系统呈非线性及滞后性特点,这为系统控制的准确性带来了很大的难题。在单晶炉设计中最重要的是直径控制部分,精密而有效的直径自动控制技术是提高晶体质量和成品率的重要条件,全自动系列设备一般采取外围反馈设置体现晶体直径的变化,通过反馈机构得到的数据经处理后控制功率输出,改变系统温场温度,最终控制晶体的结晶直径。目前,通用的反馈方式分为称重反馈法、光环成像法、弯月角反射法及热偶反馈法等<sup>[4]</sup>。本文采用的上称重控制方式是一种典型的称重法应用,其原理是将晶体在生长过程中的质量变化信号取出,与设定的理论晶体生长速率比较,取其偏差信号作为控制信号,以达到控制晶体生长速度的目的<sup>[5]</sup>。由图1可知,精密称重平台处于晶体提拉杆上方,称重平台称重所得为 $W_G$ ,即

$$W_G = W_L + W_s + W(\theta, D, f, R, M, \dots) \quad (1)$$

式中: $W_L$ 为旋转电机及联接杆质量,为一固定值; $W_s$ 为晶体质量; $W()$ 函数为晶体固液界面的张力作用结果,此函数与固液界面弯月角 $\theta$ 、晶体直径 $D$ 、液体粘滞系数 $f$ 、晶体转速 $R$ 、坩埚液面高度 $M$ 等有关。当采样时间足够短时,且直径相对较大时,液体表面张力相对晶体重力作用变化可忽略,即

$$\Delta W(\theta, D, f, R, M, \dots) = \Delta W_L = 0 \quad (2)$$

此时单位采样时间内电子秤增加的质量即可认为晶体增加的质量,即

$$\Delta W_G = \Delta W_s \quad (3)$$

单位时间内晶体生长体积可用圆台体积计算,则单位时间内晶体生长质量为

$$\Delta W_s = \rho \cdot \pi \cdot H \cdot (r_1^2 + r_2^2 + r_1 \times r_2) / 3 \quad (4)$$

$$H = V \cdot T \quad (5)$$

式中: $\rho$ 为晶体固体密度; $H$ 为单位时间晶体生长的高度; $r_1$ 为当前晶体半径; $r_2$ 为前一时刻晶体半径; $V$ 为晶体生长速度(含液面下降速度); $T$ 为单位采样时间。由此可见,参数确定后,可通过晶体增加的质量计算出准确的晶体直径数值,将此值与理论数值比较以确定温场高低。其控制原理如图2所示。

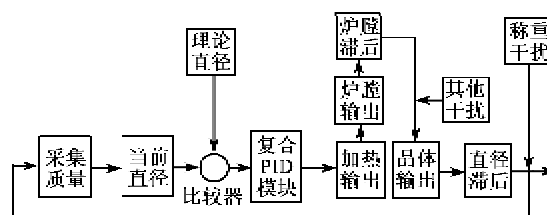


图2 质量控制原理图

### 2.2 系统组成及控制

全自动单晶炉设备与半自动设备相比,主要区别是其控制系统。全自动设备基本采用单片机或计算机系统作为控制核心,通过此分别与运动驱动系统、称重系统、加热系统、报警系统及真空系统进行双向通讯,并根据各部件间的通讯数据计算出实际晶体生长速度,将此速度与控制系统理论数据库中获取的理论速度相比而输出控制参数。控制系统框图如图3所示。

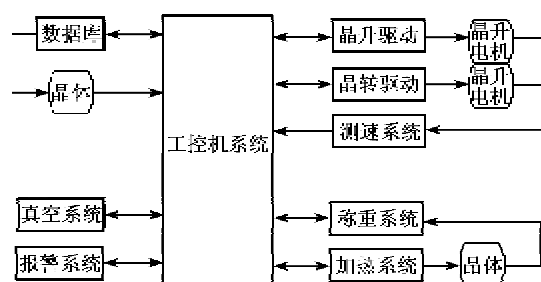


图3 系统组成框图

### 2.3 软件设计流程图

根据提拉法单晶炉温场控制系统的要求,结合自动控制系统的的需求,为了获得良好的自动控制效果,软件系统设计应能满足如下要求:

1) 程序采取模块化设计结构,各部分功能间独立运行。

2) 各模块间采用串并口通讯方式实时传递数据。

3) 系统各个模块逻辑准确,优先级分明,中断有效可靠。

4) 系统数据采样及数据处理滤波应着重实时

性和准确性。

5) 温场控制模块应充分考虑系统非线性大滞后特点

系统程序框图如图4所示,通讯模块、数据采样模块、控制模块与中断模块各部分并行运行。

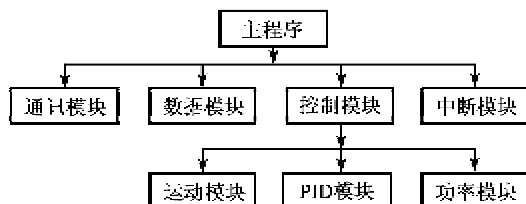


图4 主程序模块框架

数据通讯模块采用 RS232 串口通讯方式,以事先约定好的通讯协议完成数据的直接传输,通讯模块设计流程图如图5所示。

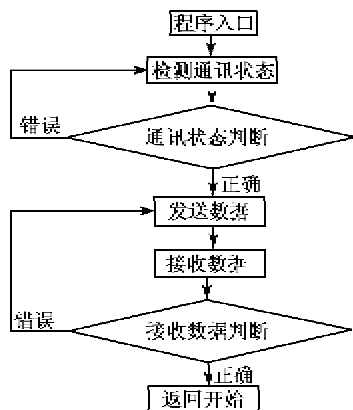


图5 数据通讯模块

数据采样模块是通过数据采集卡获取系统所需的各项数据,通过实时采集滤除掉无效和冗余的数据后,进入控制输出,系统自控的稳定性很大程度上取决于数据采样的好坏。图6为采样模块。

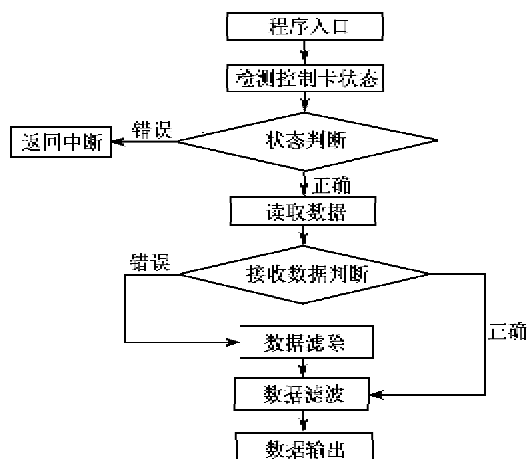


图6 数据采样模块

主控制程序是系统自控重要程序,其程序流程

框架如图7所示。

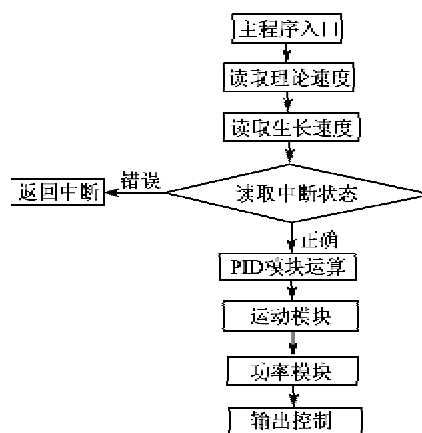


图7 主程序模块

## 2.4 设备技术参数

表1为设备技术参数。

表1 设备技术参数

|              |                          |
|--------------|--------------------------|
| 炉膛尺寸/mm      | ∅800×1 000(可选)           |
| 称重分辨率/mg     | 10                       |
| 晶升速度         | 0.01 mm/h~100 mm/min     |
| 晶转速度/(r/min) | 1~50(可选)                 |
| 功率精度         | 0.1%(40 kW 功率可选)         |
| 真空度/Pa       | <1×10 <sup>-3</sup> (可选) |

## 3 系统仿真

随着计算机技术的发展,计算机仿真使用越来越普遍,且从系统的安全性、经济性和可行性角度考虑,较之在实际系统上试验具有明显的优越性。本文采用 MATLAB 软件对系统进行建模及仿真。以目前较流行的钇铝石榴石(YAG)晶体进行试验。炉膛函数及晶体函数均考虑为一阶惯性函数加滞后环节组成<sup>[6]</sup>。系统经历炉膛及晶体两重滞后影响。炉膛传递函数为

$$G_1(S) = \frac{K_1 e^{-\tau_1 s}}{T_1 S + 1} \quad (6)$$

式中:  $K_1$  为特性系数;  $\tau_1$  为炉膛滞后系数;  $T_1$  为周期常数,根据炉膛及水气炉环境不同,这里  $K_1 = 16 \text{ W}/(^{\circ}\text{C})$ ,  $\tau_1 = 6$ ,  $T_1 = 20$ 。

晶体传递函数为

$$G(S) = \frac{K e^{-\tau s}}{TS + 1} \quad (7)$$

取值  $K = 18 \text{ W}/(^{\circ}\text{C})$ ,  $T = 300$ ,  $\tau = 18$ , 根据系统传递函数建模,模型函数大体框图如图2所示,其中PID模块采用专家控制系统加滞后补偿环节控制。相对普通增量式PID系统,本系统在控制精确性及

快速响应方面有极大的改善。通过 MATLAB 模拟两种 PID 模块控制等径控制效果,其阶跃响应仿真结果如图 8、9 所示。

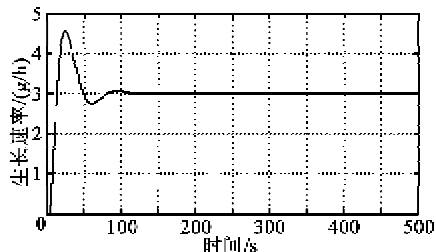


图8 普通 PID 模拟结果

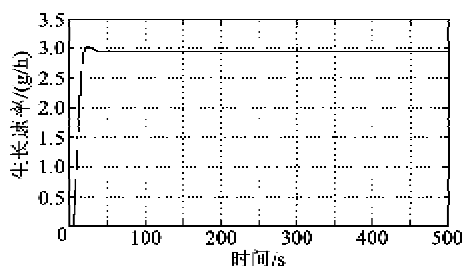


图9 复合 PID 模拟结果

由此可见,采用复合 PID 模拟状态,系统控制稳定性高,响应速度快,完全可满足系统等径控制下生长。

#### 4 应用及意义

应用上述控制系统,已成功生长出高品质、高、低温晶体,晶体外形控制精确,表面光滑,等径度能

有效控制在 $\pm 1$  mm 内,试验结果表明,在系统控制晶体生长过程中,系统温场控制稳定,晶体结晶速度均匀,有效遏制了系统非线性及滞后的影响该系统生长过程中自动化程度高,引晶完成后即可全程自动控制,人为因素影响小,广泛适应于压电类、激光类和光学类等各种高、低温晶体的控制,能兼容电阻及感应类加热电源的控制。系统各项性能指标均达到国际先进水平。

本系统通过阐明如何对时变、非线性、大滞后系统对象的控制方法,取得了极佳的应用控制效果,作为一种工业高精度温度过程控制的典型应用,该系统在控制过程中的成功应用。

#### 参考文献:

- [1] 姚连增. 晶体生长基础[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1995.
- [2] 张克从,张乐德. 晶体生长与技术上[M]. 北京:科学出版社,1997.
- [3] 张克从,张乐德. 晶体生长与技术上[M]. 北京:科学出版社,1997.
- [4] 刘兵. CZ150 直拉单晶炉一热场控制系统的研究[D]. 浙江:浙江大学,2006.
- [5] 王岩,康明,李敏远. 直拉法晶体生长的晶体形状控制算法[J]. 兵工自动化,2006,25(1):58-59.
- [6] 孙军,孔勇发,李兵,等. 等径控制系统的改进及在光学铌酸锂生长中的应用[J]. 人工晶体学报,2004,33(3):306-309.
- [7] ZigBee[J]. Automation & Instrumentation, 2010(1): 61-63.
- [8] 彭胜华,李萍. 便携式远程生理多参数实时监护报警系统的研制[J]. 医疗卫生装备,2010,31(8):39-41. PENG Shenghua, LI Ping. Design of portable multi-physiological-parameter real-time telemonitoring and alarming system[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2010,31(8):39-41.
- [9] 高守玮,吴灿阳. ZigBee 技术实践教程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2009.
- [10] 王翠茹,于祥兵,王成福. 基于 ZigBee 技术的温度采集传输系统[J]. 仪表技术与传感器,2008(7):103-105. WANG Cuiru, YU Xiangbing, WANG Chengfu. Design of temperature acquiring and transmission system based on ZigBee technique[J]. Instrument Technique and Sensor, 2008(7):103-105.
- [11] 刘雅举,蔡振江,张莉,等. 基于射频芯片的 ZigBee 无线传感器网络节点的设计[J]. 微计算机信息,2007(22):167-168. LIU Yaju, CAI Zhenjiang, ZHANG Li, et al. The design of ZigBee wireless sensor network node based on RF CC2430[J]. Control & Automation, 2007(22): 167-168.
- [12] 嘉霖. 中国城乡老年人口状况追踪调查[EB/OL]. <http://www.china.com.cn>, 2007-12-17.
- [13] 贾文娟,白燕萍,绳秀君,等. 生理多参数远程监护系统的研究进展[J]. 综合,2009,24(8):76-78. JIA Wenjuan, BAI Yanping, SHENG Xiujun, et al. Development of physiological multi-parameters telemonitoring system[J]. In General, 2009, 24(8):76-78.
- [14] 唐伟,黄晓庆,杨常清. 多参数监护仪的发展与未来[J]. 北京生物医学工程,2003,22(1):72-73. TANG Wei, HUANG Xiaqing, YANG Changqing. The development and future of multi-parameter monitors[J]. Beijing Biomedical Engineering, 2003, 22(1): 72-73.
- [15] 曹彦,龙夏,刘原. 基于 ZigBee 的集散多参数医疗监护系统的设计[J]. 自动化与仪器仪表,2010(1):61-63. CAO Yan, LONG Xia, LIU Yuan. Design of multiple physiological parameter monitoring system based on

(上接第 139 页)

#### 参考文献: