

# 铁质喷丸流量测控仪的设计<sup>\*</sup>

刘士兴 李航 李帮金 胡平辉

(合肥工业大学微电子学院 合肥 230009)

**摘要:** 喷丸处理作为一种常用的金属表面强化工艺,通过喷丸流的冲击作用,能够有效增强材料的抗疲劳性能并延长其使用寿命。为实现抛丸机气喷钢丸流量的精准测控,研制了一种集检测与控制功能于一体的铁质喷丸流量测控装置。基于电磁场理论分析铁质喷丸流量检测原理,建立铁质喷丸对螺线管传感器磁场分布特性影响的等效模型,并通过有限元仿真进行功能验证。检测单元采用电感数字转换电路 LDC1612,基于 LC 并联谐振实现铁质喷丸流量的采集,并通过周期性平均值滤波算法消除测量噪声。喷丸流量经控制单元 PID 运算输出控制信号,通过动态调节 PWM 信号的占空比,控制电磁阀的开闭时间,实现喷丸流量的闭环控制。实验结果表明,S330 和 S110 喷丸流量与 LC 谐振频率差之间呈线性关系,喷丸流量与 PWM 信号占空比呈两段线性关系,拟合度均优于 99.2%。S330 喷丸流量检测精度达到  $\pm 2.5\%$ ,S110 喷丸流量检测精度达到  $\pm 4.33\%$ ,验证了该测控系统的优异计量特性。

**关键词:** 铁质喷丸流量;螺线管传感器;电磁感应;电感数字转换;有限元仿真

**中图分类号:** TN98      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 510.80

## Design of ferrous shot flow measurement and control instrument

Liu Shixing Li Hang Li Bangjin Hu Pinghui

(School of Microelectronics, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** As a widely adopted surface strengthening technique for metals, shot blasting treatment can effectively enhance material fatigue resistance and extend service life by inducing compressive residual stresses through high-velocity shot impacts. To achieve precise measurement and control of the steel shot flow in shot blasting machine, a ferrous shot flow measurement and control device with integrated detection and control capabilities has been developed. The principle of ferrous shot flow detection was analyzed based on electromagnetic field theory, and an equivalent model describing the influence of ferrous shot flow on the magnetic field distribution characteristics of the solenoid sensor was established. This principle was validated through finite element simulation. The LDC1612 inductance-to-digital conversion circuit was adopted in the detection, data acquisition of ferrous shot flow rate was achieved based on the LC parallel resonance and the measurement noise was eliminated via a periodic average value filtering algorithm. The controller generates control signals based on the collected flow data through PID operation, while the control unit dynamically adjusts the duty cycle of the generated PWM signal to regulate the opening and closing time of the solenoid valve, thereby the closed-loop control of the shot flow was achieved. Experimental results demonstrated a linear relationship between the S330 and S110 shot flows and the difference in LC resonant frequency, as well as a two-segment linear relationship between the shot flow and the duty cycle of the PWM signal, with a fitting accuracy exceeding 99.2%. The detection accuracy for the S330 shot flow reaches  $\pm 2.5\%$ , and for the S110 shot flow, it reaches  $\pm 4.33\%$ , the excellent metrological performance of this integrated measurement and control system was confirmed.

**Keywords:** ferrous shot flow; solenoid sensors; electromagnetic induction; inductive digital conversion; finite element simulation

## 0 引言

随着社会的不断进步与科技的持续发展,重工业、制造业等众多领域对金属疲劳强度的要求日益提高。在此背景下,抛(喷)丸技术应运而生,为增强金属工件的抗疲劳性能提供了有效的解决方案。经过多年的发展与完善,该技术已在汽车制造、船舶工程及航空航天等领域得到广泛应用,展现出广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。抛丸机常用的喷料包括石英砂、陶瓷丸、铁砂以及钢丸等,其中标准型号钢丸 S330(直径 1 mm)和 S110(直径 0.3 mm)<sup>[2]</sup>尤为常见。压力式抛丸机以压缩空气为驱动力,将喷料高速喷射至金属工件表面,达到去除氧化皮、改善表面质量、增强抗疲劳性能的目的,显著提高工件的抗腐蚀能力并延长其使用寿命<sup>[3]</sup>。喷丸流量的测控精度直接影响抛丸机的工作性能,深入研究铁质喷丸(即钢丸)流量的测量与控制,对提升喷涂质量具有重要意义。

螺线管式电感传感器作为一种有效的铁质颗粒检测手段,广泛应用于金属种类识别与颗粒尺寸测量等领域。根据螺线管线圈结构的不同,可分为单线圈、双线圈及三线圈等形式。文献[4]采用单线圈传感器检测管道内油液中的金属磨粒,并通过优化并联电容显著提升了检测灵敏度。文献[5]建立了电感传感器的等效电路模型,并对结构参数进行优化设计。文献[6]将具有高磁导率的坡莫合金嵌入传感器的敏感区域,有效提高了检测精度和信噪比。文献[7]采用电感数字转换电路 LDC1000 对气喷水射流中的金属颗粒进行检测,提升了检测精度,增强了系统抗干扰能力。综上所述,螺线管式电感传感器在金属颗粒的检测与识别方面表现出较高的灵敏度和可靠性。然而,在金属颗粒大流量测量方面的研究相对较少,相关技术和参考资料略显匮乏。

在材料表面处理、铸造件加工以及煤矿开采等工业领域。需要监测持续的金属颗粒流,而抛丸机是其典型应用场景。金属颗粒流的检测与磨粒检测都是基于电磁感应原理,对气喷钢丸流量的检测,由于其自身特点存在测控精度不足、响应速度慢、抗干扰能力弱以及自动化程度偏低等问题。本文提出一种钢丸流量一体化测控系统设计方案,以螺线管式电感作为铁质喷丸传感器,采用电感数字转换电路实现钢丸流量检测。通过动态调节脉冲宽度调制信号的占空比控制电磁阀的开闭,实现钢丸流量控制。基于闭环控制原理设计的一体化流量测控装置,提高了测控精度和响应速度,增强了系统的抗干扰能力,实现铁质喷丸流量的自动化控制。

## 1 钢丸流量一体化测控方案

### 1.1 测控方案的总体设计

螺线管电感传感器基于电磁感应和磁阻变化的原理检测钢丸流量<sup>[8-9]</sup>。铁磁性钢丸靠近传感器时会被磁化,磁导率增加,磁阻减小,导致电感值增大。螺线管传感器利用 LC 并联谐振电路将电感值转化为对应的频率信号,通过测量频率值实现钢丸流量的采集。如图 1 所示,钢丸流量测控系统由钢丸流量测控一体化装置和控制器两部分组成。

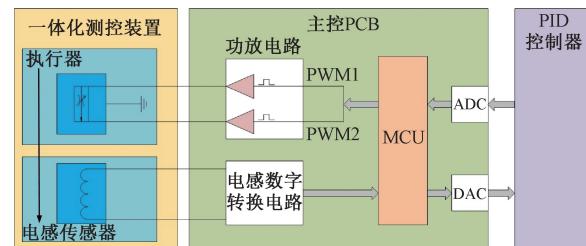


图 1 钢丸流量测控系统框图

Fig. 1 Block diagram of the steel shot flow measurement and control system

系统工作流程为通过控制器设定钢丸流量,螺线管传感器实时测量实际钢丸流量,电感数字转换电路将传感器的电感值转换为数字量。控制单元采集该数字量,并将其转换为与钢丸流量成正比的电压信号,作为比例积分微分(proportional integral & derivative, PID)控制器的输入测量值。PID 控制器根据设定值与测量值的偏差做运算输出控制信号,用于调节脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)信号的占空比。经功率放大驱动电磁阀执行器的开启或关闭。从电感传感器到电磁阀执行器构成一个闭环测控控制系统,实现对钢丸流量的精确测量和控制并保持系统的稳定运行。

### 1.2 螺线管传感器工作原理

螺线管传感器的工作原理如图 2 所示。当螺线管通电后,其周围会产生磁场  $B_1$ 。根据磁化效应<sup>[10]</sup>,当铁质钢丸穿过通电螺线管内部时会被磁化,从而产生与螺线管磁场方向相同的附加磁场  $B_2$ ,导致磁感应强度增强。根据涡流效应<sup>[11]</sup>,当钢丸在螺线管内部的磁场中运动时,由于切割磁感线,钢丸表面会产生涡旋状的感应电流(即电涡流)。该效应会产生与螺线管磁场方向相反的附加磁场  $B_3$ ,导致磁感应强度减弱。

上述两种效应相互作用,使得螺线管的总磁感应强度发生变化,进而影响其电感值<sup>[12-13]</sup>。

螺线管内部总场强  $B$  为:

$$B = B_1 + B_2 - B_3 \quad (1)$$

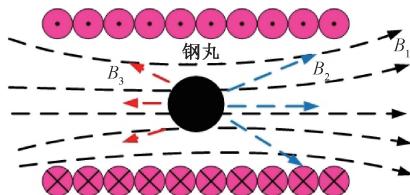


图2 螺线管传感器检测钢丸示意图

Fig. 2 The schematic of the principle of the solenoid sensor for detecting steel shot

由于铁质钢丸的相对磁导率远大于1,因此磁化效应对总磁感应强度的影响起主导作用,使传感器的电感值增大,钢丸流量越大,电感值的增加越显著。因此,通过精确测量螺线管传感器电感值的变化量,可以实现对铁质钢丸流量的有效检测。

### 1.3 电磁阀的钢丸流量控制原理

电磁阀作为一种重要的流量控制元件,在仪器仪表的自动化控制系统中得到了广泛应用。电磁阀是通过电磁铁线圈产生的磁力作用驱动阀门的开启或关闭,实现对介质流量的精确控制<sup>[14]</sup>。本设计选用常闭型电磁阀<sup>[15]</sup>,其具体结构剖面图如图3所示。

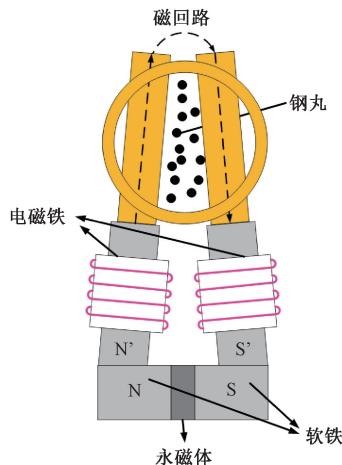


图3 电磁阀结构剖面图

Fig. 3 Sectional diagram of solenoid valve structure

该电磁阀主要由稀土永磁体和电磁铁两部分组成,由于永磁体的磁力作用,钢丸在断电时被吸附,使电磁阀保持常闭状态。当电磁铁线圈通电时,产生的磁场与永磁体的磁场大小相等且方向相反,两者相互抵消,对钢丸的吸附作用消失,使电磁阀开启。通过调节电磁铁线圈的通/断电时间比例,可实现对钢丸流量的精确控制。具体方式是PID控制信号调节PWM信号的占空比,占空比越大,通电时间越长,钢丸流量随之增大。这种基于PWM控制电磁阀的钢丸流量调节方法,不仅能够实现对钢丸流量的精准控制,还具有较高的响应速度和调节精度。

## 2 螺线管传感器设计与仿真

### 2.1 螺线管传感器数学模型

根据毕奥-萨伐尔定律,单个载流圆导线在空间中任意点P处的磁场矢量如式(2)所示<sup>[16]</sup>。

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \quad (2)$$

式中: $\mu_0$ 为真空磁导率; $Id\vec{l}$ 为电流元; $\vec{r}$ 为电流元到空间点P的距离矢量; $\vec{dB}$ 为点P处的磁场矢量。

单层螺线管可视为由多个载流圆导线紧密排列而成,如图4所示。

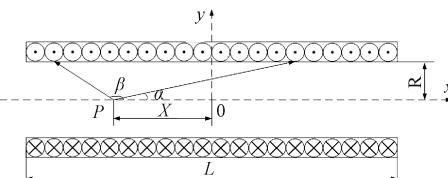


图4 单层螺线管磁场分析

Fig. 4 Single layer solenoid magnetic field analysis diagram

螺线管轴线上某点的磁感应强度如式(3)所示<sup>[17]</sup>。

$$B = \frac{N\mu_0 IR^2}{2(R^2 + X^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (3)$$

式中: $R$ 为螺线管半径; $I$ 为电流; $N$ 为匝数; $X$ 为点P到中心点O的距离。当 $N=1$ 时,即为单匝线圈中心轴线上某点的磁感应强度。由式(3)可知,螺线管磁场强度与线圈匝数、线圈半径以及线圈长度等有关。

当钢丸流经螺线管传感器时,可将其等效为一个球体,此时磁感应强度增量 $\Delta B$ 如式(4)所示。

$$\Delta B = \frac{NIR^2}{2(R^2 + X^2)^{\frac{3}{2}}} \frac{4\pi r_c^3}{3} (\mu_r - \mu_0) \quad (4)$$

式中: $r_c$ 为球体半径; $\mu_r$ 为钢丸的相对磁导率。由于 $\mu_r \gg \mu_0$ ,螺线管的磁感应强度显著增强,且磁感应强度主要集中在钢丸周围区域。

### 2.2 螺线管传感器有限元仿真

基于有限元电磁场分析软件Ansoft Maxwell对螺线管传感器进行参数计算和性能仿真。通过Maxwell 3D建立螺线管传感器的三维结构模型,并进行静磁场仿真<sup>[18]</sup>。螺线管电感支架外径19.2 mm,长度38 mm,匝数84,绕线为线径0.4 mm的纯铜。添加电流源激励,设置求解域,采用诺伊曼边界条件,通过自适应网格划分技术确保仿真的计算精度。

图5(a)所示为空载螺线管的三维等效模型,求解

螺线管有限元模型, 得到其磁感应强度分布云(图 5(b))和磁感线分布(图 5(c))。仿真结果表明, 螺线管内部的磁感应强度在中心区域达到最大值, 且近似为均匀磁场。从中心至两侧, 磁感应强度逐渐减弱, 并呈对称分布。

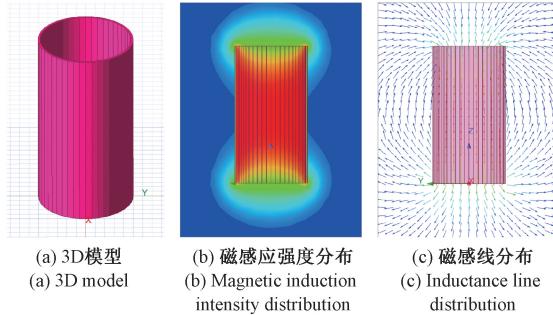


图 5 空载螺线管磁场分布特性

Fig. 5 The magnetic field distribution characteristics of unloaded solenoid sensor

为验证钢丸对螺线管传感器磁场分布的影响效果, 将一定数量的钢丸等效为一个半径为 5 mm 的球体, 置于螺线管中心区域。建立包含该球体的三维结构等效模型, 球体材料设置为钢, 并进行网格划分, 其他求解条件不变。图 6 所示为钢丸对螺线管传感器磁场分布影响的效果。

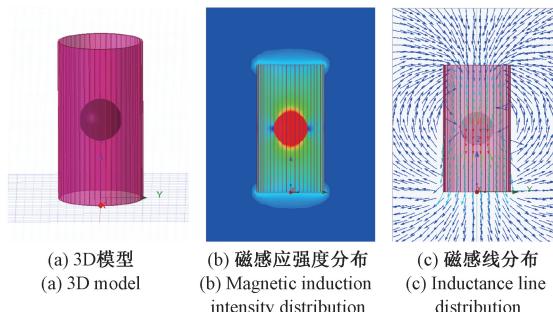
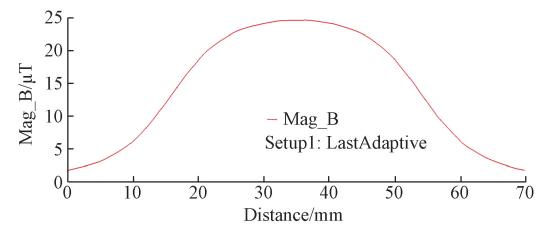


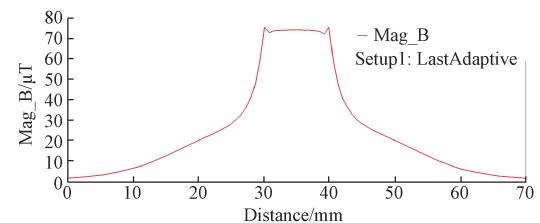
图 6 含钢丸的螺线管磁场分布特性

Fig. 6 The magnetic field distribution characteristics of solenoid sensors containing steel shot

为了更直观地分析磁场强度的变化规律, 在有/无钢丸的两个 3D 模型的中心轴线位置分别添加一条辅助线, 以便查看磁场强度沿轴线位置的分布规律和数值大小。如图 7 所示, 横轴为沿轴线方向的距离, 16~54 mm 处为螺线管区域, 30~40 mm 处为钢丸所处位置, 磁感应强度显著增强, 且磁感应强度主要集中在钢丸周围, 这与式(4)的理论推导相一致。因此, 采用此参数绕制的螺线管传感器能够有效地对钢丸流量进行测量。



(a) 无钢丸时螺线管磁场分布  
(a) The magnetic field distribution of the solenoid without steel shot



(b) 有钢丸时螺线管磁场分布  
(b) The magnetic field distribution of the solenoid containing steel shot

图 7 螺线管磁场分布对比

Fig. 7 Comparison of magnetic field distribution of solenoid sensor

### 3 测量电路设计与数据处理

#### 3.1 螺线管传感器测量电路设计

螺线管式电感传感器是基于电磁感应原理工作的, 螺线管内钢丸数量的多少使磁场强度变化, 进而改变其电感值。钢丸流量越大, 螺线管电感值越大, 将螺线管等效为可变电感  $L$  与定值电容  $C$  并联产生谐振, 采用 LC 谐振测频法<sup>[19]</sup> 计算其电感量。并联谐振频率如式(5)所示<sup>[20-21]</sup>。

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (5)$$

式中:  $L$  为螺线管电感;  $C$  为并联电容值。电感值  $L$  变化, 谐振频率  $f$  随之变化, 测量谐振频率  $f$  的变化量即可得到电感变化值, 进而推算出钢丸流量。

如图 8 所示, 电感数字转换电路产生正弦激励电流驱动 LC 并联电路产生谐振, 通过测量谐振信号的频率的变化推算钢丸流量, 实现螺线管传感器内钢丸流量数据的采集。

为实现电感量的高精度数字转换, 并提升电路的稳定性和可靠性, 采用 TI 公司的电感数字转换集成芯片 LDC1612。该电路支持 40 MHz 的外部时钟, 输出与电感量成正比的 28 位数字量, 能够实现微小电感变化量的高分辨率检测<sup>[22]</sup>。单片机控制单元通过 I<sup>2</sup>C 接口配置 LDC1612 内部寄存器, 读取谐振频率数据, 为钢丸流量计算提供可靠的数据采集。

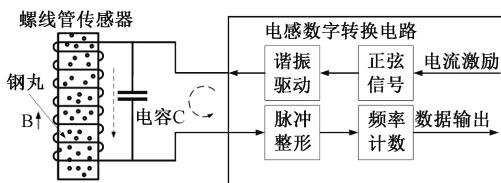


图 8 电感数字转换电路原理

Fig. 8 Schematic diagram of inductance digital conversion circuit

### 3.2 螺线管传感器采集数据处理

由于使用 PWM 波对电磁阀执行器进行驱动,导致阀门反复通断,螺线管内部钢丸流量随占空比呈周期性波动。因此,LDC1612 采集到的谐振频率也具有周期性波动的特点。为了有效消除这种周期性干扰,提高数据的平滑度和准确性,采用周期性平均值滤波算法对采集到的与钢丸流量对应的数据进行滤波处理。该滤波算法如式(6)、(7)所示,对应的软件流程如图 9 所示。

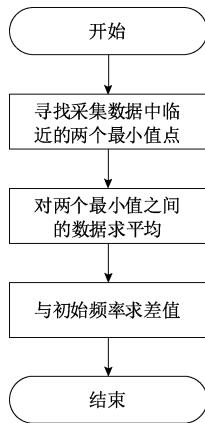


图 9 周期性平均值滤波算法流程

Fig. 9 Flowchart of periodic average filtering algorithm

$$f_1 = \frac{\sum_{i=1}^N f_i}{N} \quad (6)$$

$$\Delta f = f_0 - f_1 \quad (7)$$

式中:N 为两个最小值之间的数据个数,即一个周期内的数据量; $f_i$  为不同占空比下采集到的频率值; $f_0$  为无钢丸时的初始频率; $f_1$  为经滤波处理后的频率平均值; $\Delta f$  为频率差。

经周期性平均值滤波算法处理后的数据如图 10 所示。可以看出,经滤波处理的数据趋势更加平稳,有效抑制了 PWM 驱动引起的噪声干扰。

## 4 实验数据分析

钢丸流量一体化测控装置的实验测试平台如图 11 所示,测控阀体与 PID 控制器形成闭环控制系统,实现对

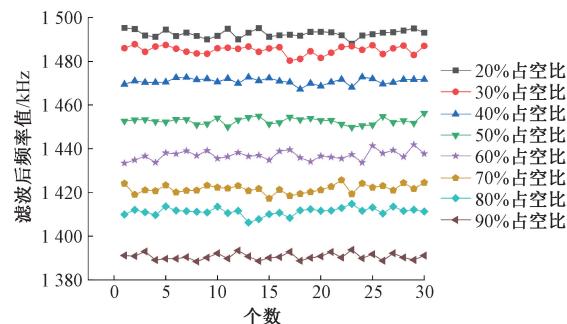


图 10 不同占空比下滤波后频率曲线

Fig. 10 Frequency curves after filtering under different duty cycles

钢丸流量的精确测控。红色按钮为控制系统供电开关,绿色按钮用于启动定时器,使测控阀进入工作状态,定时器设定倒计时 1 min,置于地面的容器接收 1 min 内通过流量测控阀的钢丸,用电子秤计量得到钢丸的质量即为测控阀 1 min 的钢丸流量。

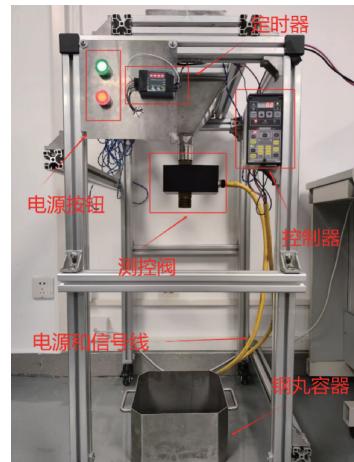


图 11 实验测试平台实物

Fig. 11 Experimental test platform

在实际应用中,阀体性能会受到多种因素的综合影响,如机械结构、电气参数和工艺精度等,导致不同阀体间存在差异。此外,由于摩擦、腐蚀等原因,长期使用也会出现不同程度的磨损或偏差。为了保证钢丸测控精度,基于 PyQt 平台开发了校准上位机应用程序,实现对钢丸流量测控仪的校准功能。

校准流程如下:首先启动上位机应用程序,计算机通过串口通信与阀体建立连接,随后进入校准模式。校准时,依次设置 PWM 信号的占空比,对应每个占空比定时器控制测控阀工作 1 min;在此期间,主控单元采集 LDC1612 测得的频率差,利用电子秤测量容器收集的钢丸质量,同时上位机接收测控阀采集的钢丸质量数据。上位机校准软件将上述参数分析运算后,下发到测控阀

以便校准 LC 谐振电路的频率差,保证测量精度。校准数据写入测控阀以后,系统重新上电即完成校准。

如图 12 所示,是对 S330 钢丸校准得到的质量与频率差之间的关系。图中钢丸质量与谐振频率差之间呈线性关系,线性拟合度 99.8%,表明该方法能够实现对钢丸流量的精确测量。

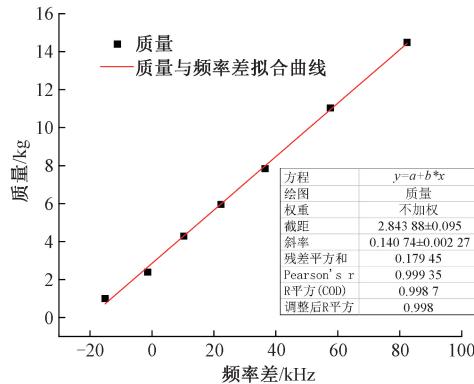


图 12 S330 质量与频率差关系

Fig. 12 S330 quality and frequency difference relationship diagram

为提升控制精度,对占空比实施分段线性化。如图 13 所示,校准后得到钢丸质量与占空比的关系曲线,在 30%~70% 的占空比区间内(红色实线),线性拟合度 99.7%;在 70%~90% 的区间内(红色虚线),拟合度 99.9%。验证了电磁阀执行器和驱动控制电路设计的合理性。

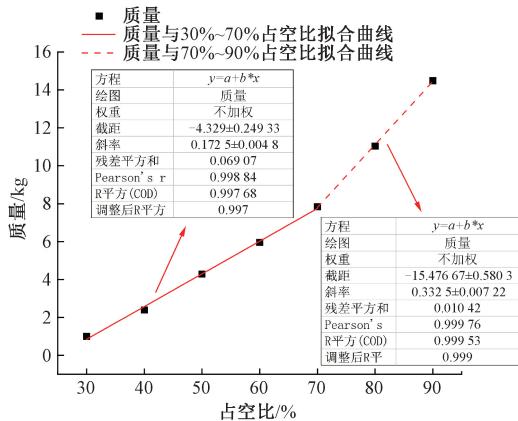


图 13 S330 质量与占空比关系

Fig. 13 S330 quality and duty cycle relationship diagram

为验证测控系统的普适性,使用钢丸 S110 再次进行校准。得到质量与频率差及占空比之间的关系,如图 14、15 所示。钢丸质量与频率差拟合度近似为 1,在 30%~70% 区间内(红色实线),质量与占空比的线性拟合度 99.6%,在 70%~90% 区间内(红色虚线),拟合度为

99.2%。该结果验证了螺线管传感器和采集电路检测的正确性以及电磁阀控制的精准。

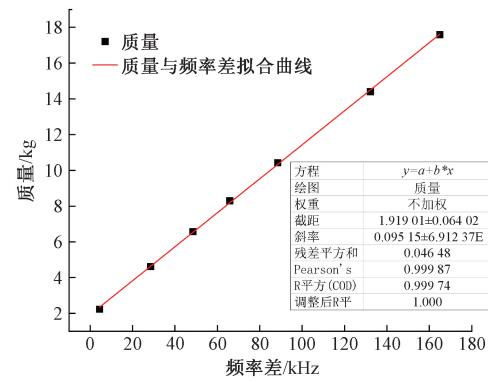


图 14 S110 质量与频率差关系

Fig. 14 S110 quality and frequency difference relationship diagram

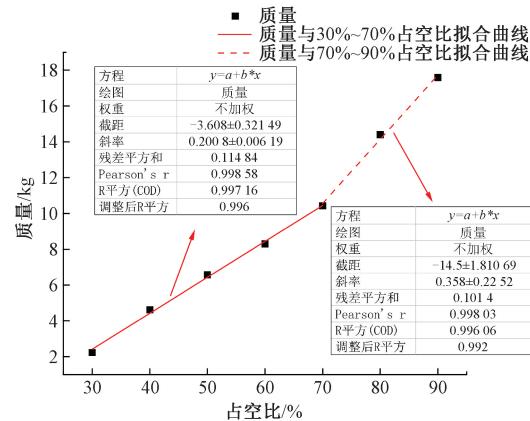


图 15 S110 质量与占空比关系

Fig. 15 S110 quality and duty cycle relationship diagram

表 1 是采用标准钢丸 S330,在 0~12 kg 量程流量测控实验结果,相对误差范围介于 0.52%~2.5%。在常用量程(4~10 kg)内可以实现更高的测控精度。同样地,表 2 为钢丸 S110 在 0~15 kg 量程流量测控实验结果,相对误差范围为 0.33%~4.33%,在常用流量范围(6~12 kg)内也可实现更高测控精度。

表 1 S330 钢丸的测试数据

Table 1 Test data of S330 steel shot

设定值/kg	测量值/kg			相对平均偏差/%
	1	2	3	
2	2.06	1.92	2.01	2.5
4	4.07	3.92	4.05	1.67
6	5.87	6.13	6.01	1.5
8	7.9	8.14	8.03	1.13
10	9.91	10.03	9.89	0.77
11	10.99	10.91	11.07	0.52

**表 2 S110 钢丸的测试数据**  
**Table 2 Test data of S110 steel shot**

设定值/kg	测量值/kg			相对平均偏差/%
	1	2	3	
4	4.18	4.16	4.18	4.33
6	6.11	6.10	6.18	2.17
8	8.1	8.05	8.12	1.13
10	10	10.1	10.08	0.6
12	11.96	12.07	11.99	0.33
14	14.05	14.09	13.98	0.38

测试结果表明,在小流量时相对误差较大,而在大流量时相对误差较小。该测控仪可与美国 EI 公司 MagnaValve 系列和日本东富科公司 FLC-E 系列的电磁测控仪相媲美,达到同等水平的 5F.S 测量精度,能够满足抛丸机工作过程中对铁质钢丸流量的测控要求。

## 5 结 论

本文研制了一种用于抛丸机铁质喷丸流量测控的一体化装置。采用螺线管传感器检测钢丸流量,高精度电感数字转换电路 LDC1612 采集传感器数据;通过调节 PWM 信号的占空比控制电磁阀的开闭时间,实现对钢丸流量精确控制。为提高系统测控精度开发了上位机校准软件对测控仪进行校准,使用标准铁质喷丸 S330 和 S110 进行实验测试。结果表明,该一体化测控仪能够实现对钢丸流量的精度测控,为抛丸机铁质喷丸流量测控提供了可靠的解决方案。

## 参考文献

- [ 1 ] 缪剑晖,熊晗,李夫亮.浅谈喷抛丸清理技术在铸造行业的应用[J].中国铸造装备与技术,2017(3):36-43.  
MIAO J H, XIONG H, LI F L. Talking about the application of shot blasting cleaning technology in the foundry industry [ J ]. China Foundry Equipment and Technology, 2017(3) : 36-43.
- [ 2 ] GAN J, GAO Z A, WANG Y, et al. Small - scale experimental investigation of fatigue performance improvement of ship hatch corner with shot peening treatments by considering residual stress relaxation [ J ]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(4) : 419.
- [ 3 ] 王伟,孙本芹,付宁,等.吊钩式抛丸机在风电行业的升级应用[J].中国铸造装备与技术,2024,59(4):15-18.  
WANG W, SUN B Q, FU N, et al. Upgrading and application of hook shot blasting machine in wind power industry [ J ]. China Foundry Equipment and Technology, 2024, 59(4) : 15-18.
- [ 4 ] 武森.基于并联谐振原理的油液磨粒多通道电感检测方法研究[D].大连:大连海事大学,2022.  
WU S. Research on multi-channel inductance detection method of oil abrasive particles based on parallel resonance principle [ D ]. Dalian: Dalian Maritime University, 2022.
- [ 5 ] 陈浩,王立勇,陈涛.电感式磨粒监测传感器线圈参数分析与优化[J].传感器与微系统,2021,40(2):12-14,18.  
CHEN H, WANG L Y, CHEN T. Analysis and optimization of coil parameters for inductive grinding particle monitoring sensor [ J ]. Sensors and Microsystems, 2021, 40(2) : 12-14,18.
- [ 6 ] LI W, BAI C, WANG C, et al. Design and research of inductive oil pollutant detection sensor based on high gradient magnetic field structure [ J ]. Micromachines, 2021, 12(6) : 638.
- [ 7 ] 赵思玮.用于水流体中金属颗粒检测的电感式传感器研究[D].西安:长安大学,2021.  
ZHAO S W. Research on inductive sensor for metal particle detection in water fluid [ D ]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- [ 8 ] 马雪皓.电感式油液磨粒检测传感器的研究[D].天津:天津工业大学,2019.  
MA X H. Research on inductive oil grinding particle detection sensor [ D ]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2019.
- [ 9 ] 刘恩辰,张洪朋,张鑫睿,等.双线式螺线管型磨粒传感器设计及其实验研究[J].大连海事大学学报,2016,42(2):102-106,116.  
LIU EN CH, ZHANG H P, ZHANG X R, et al. Design and experimental study of dual line solenoid type abrasive particle sensor [ J ]. Journal of Dalian Maritime University, 2016, 42(2) : 102-106,116.
- [ 10 ] 盛晨兴,王会扬.电涡流磨粒传感器磁场仿真研究[J].润滑与密封,2019,44(2):1-5.  
SHENG CH X, WANG H Y. Magnetic field simulation study of eddy-current abrasive grain sensor [ J ]. Lubrication and Sealing, 2019, 44(2) : 1-5.
- [ 11 ] 陶盟.电感式金属磨粒监测传感器的设计与研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2022.  
TAO M. Design and research of inductive metal abrasive particle monitoring sensor [ D ]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [ 12 ] 万真志,王衍学,陈志刚.基于径向交变磁场的油液磨粒传感器设计[J].电子测量与仪器学报,2023,37(3):238-245.  
WAN Z ZH, WANG Y X, CHEN ZH G. Design of oil

- abrasive sensor based on radial alternating magnetic field [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(3): 238-245.
- [13] 白晨朝, 张洪朋, 曾霖, 等. 应用磁性纳米材料的电感式油液金属磨粒检测传感器 [J]. 光学精密工程, 2019, 27(9): 1960-1967.
- BAI CH CH, ZHANG H P, ZENG L, et al. Inductive oil metal abrasive particle detection sensor using magnetic nanomaterials [J]. Optical Precision Engineering, 2019, 27(9): 1960-1967.
- [14] 张铭远. 气动流量比例伺服阀的控制关键技术 [D]. 北京: 北方工业大学, 2021.
- ZHANG M Y. Key control technology of pneumatic flow proportional servo valve [D]. Beijing: North China University of Technology, 2021.
- [15] 季恩泽, 郭斌, 胡晓峰, 等. 线控制动电磁阀响应特性仿真及测试方法研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(9): 95-102.
- JI E Z, GUO B, HU X F, et al. Research on simulation and test method of response characteristics of brake-by-wire solenoid valve [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(9): 95-102.
- [16] 牛泽, 李凯, 白文斌, 等. 电感式油液磨粒传感器系统设计 [J]. 机械工程学报, 2021, 57(12): 126-135.
- NIU Z, LI K, BAI W B, et al. Design of inductive oil abrasive sensor system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(12): 126-135.
- [17] 文振华, 赵小飞, 李树豪. 电感式全流量滑油磨粒传感器特性影响因素分析 [J]. 郑州航空工业管理学院学报, 2022, 40(6): 50-57.
- WEN ZH H, ZHAO X F, LI SH H. Analysis of influencing factors of characteristics of inductive full-flow lubricating oil abrasive sensor [J]. Journal of Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, 2022, 40(6): 50-57.
- [18] 刘子琦, 陈启梦, 李子博, 等. 基于磁悬浮式基因生物成像扫描仪电磁结构设计 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(2): 128-137.
- LIU Z Q, CHEN Q M, LI Z B, et al. Design of electromagnetic structure of genetic bioimaging scanner based on magnetic levitation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(2): 128-137.
- [19] 周亚楠. 基于电感式传感器的废金属识别关键技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2022.
- ZHOU Y N. Research on key technologies of scrap metal identification based on inductive sensors [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2022.
- [20] WU Y, ZHANG H. An approach to calculating metal particle detection in lubrication oil based on a micro inductive sensor [J]. Measurement Science & Technology, 2017, 28(12): 125101.
- [21] 刘扬婧, 曹彪. 锥形线圈无线电能传输特性优化 [J]. 电子测量技术, 2022, 45(19): 12-18.
- LIU Y J, CAO B. Optimization of wireless power transfer characteristics of conical coil [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(19): 12-18.
- [22] 王天资, 涂孝军, 章建文, 等. 基于 LDC1612/1614 芯片的全金属电感式接近传感器设计及研究 [J]. 测控技术, 2019, 38(5): 67-71.
- WANG T Z, TU X J, ZHANG J W, et al. Design and research of all-metal inductive proximity sensor based on LDC1612/1614 chip [J]. Measurement and Control Technology, 2019, 38(5): 67-71.

### 作者简介



**刘士兴**(通信作者), 2004 年于中国科学技术大学获得博士学位, 现为合肥工业大学(副教授), 主要研究方向为集成电路测试技术、机器视觉与智能制造、电子测量及核电子学、可编程器件与集成系统设计等。  
E-mail: liusx@hfut.edu.com

**Liu Shixing** (Corresponding author) received his Ph. D. degree from the University of Science and Technology of China in 2004. Now he is an associate professor at Hefei University of Technology. His main research interests include integrated circuit test technology, machine vision and intelligent manufacturing, electronic measurement and nuclear electronics, programmable devices, and integrated system design, etc..



**李航**, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为数字系统设计自动化和电子测量。  
E-mail: 1580157045@qq.com

**Li Hang** is a M. Sc. candidate at Hefei University of Technology. His main research interests include digital system design automation and electronic measurement.