

基于单片机的自由活塞制冷机测控系统设计

范伟成¹, 王 丰², 李勇杰¹, 黄兴东¹

(1. 上海齐耀动力技术有限公司, 上海 201203; 2. 中国船舶重工集团公司 第七一一研究所, 上海 201203)

摘要: 为了实现对自由活塞斯特林制冷机相关参数的测控, 开发了一套基于 HCS12 单片机的测控系统, 该测控系统采用 MC9S12DG256 单片机, 选取了合适的传感器测量压力、温度、电压和电流等参数; 采用 PC 机作为上位机, 使用组态王软件设计了人机对话窗口; 为了保证制冷机安全可靠运行, 采用反电动势控制策略实现制冷机直线电机行程控制, 采用快速制冷与温度 PID 控制相结合的控制策略实现制冷机冷端温度的控制; 其经验可以用于其它类似的测控系统的研制工作。

关键词: MC9S12DG256; 自由活塞; 制冷机; 测控系统

Design of Measurement and Control System of Free Piston Refrigerator Based on Embedded Microcontroller

Fan Weicheng¹, Wang Feng², Li Yongjie¹, Huang Xingdong¹

(1. Shanghai Micropowers Ltd., Shanghai 201203, China;

2. No. 711 Research Institute, China Shipbuilding Industry Corp, Shanghai 201203, China)

Abstract: In order to realize the measurement and control of relevant parameters of free piston Stirling refrigerator, a measurement and control system based on HCS12 Embedded Microcontroller is developed. MC9S12DG256 Embedded Microcontroller is used in the measurement and control system, and suitable sensors are selected to measure the parameters of pressure, temperature, voltage and current. The PC machine is used as the host computer, and the human-machine conversation window is designed by using King-view software. In order to ensure the safe and reliable operation of the refrigerator, the back EMF control strategy is used to realize the travel control of the linear motor of the refrigerator, and the fast refrigeration and temperature PID control strategy are used to realize the temperature control of the cold end of the refrigerator. Its experience can be applied to other similar measurement and control systems.

Keyword: MC9S12DG256; free piston; refrigerator; measurement and control system

0 引言

自由活塞斯特林制冷机采用直线电机、纯气动膨胀等先进技术, 具有结构紧凑、低振动噪音、寿命长、制冷量方便可调等优点。近年来, 传统制冷系统由于臭氧层破坏、温室效应等原因而受到越来越严格的限制, 这为自由活塞斯特林制冷机的发展提供了难得的历史机遇。与传统的蒸汽压缩节流制冷有极大不同, 自由活塞斯特林制冷机采用氦气膨胀制冷, 无节流系统和蒸发器, 具有高效率、“绿色”制冷剂、制冷温区广等特点, 在环保和节能方面具有重要优势^[1]。

由于自由活塞斯特林与直线电机紧密融合为一体, 因此自由活塞斯特林制冷机性能调节与控制技术是制冷机稳定运行的关键技术之一, 测控系统担负着制冷机运行状态监测和对其进行控制保护的重要任务。测控系统性能优劣对制冷功能任务的完成与否以及设备运行性能表现影响很大, 因此, 测控系统的研制开发工作在制冷机项目研

制过程中显得尤为重要。

为了实现对自由活塞斯特林制冷机相关参数的测量与控制, 设计了一套基于单片机的测控系统, 采用 HCS12 单片机作为核心微处理器, 以完成制冷机状态检测和控制任务, 测量相关数据以研究自由活塞斯特林制冷机的特性。

1 测控系统设计及硬件组成

根据自由活塞斯特林制冷机要求, 测控系统总体设计如图 1 所示。本测控系统基于 MC9S12DG256^[2] 单片机, 属于 HCS12 系列。大多数单片机均采用 JTAG 仿真调试方式, MC9S12DG256 单片机采用 BDM 单线背景调试模式为开发者提供了便利, 其能在单片机运行时对单片机进行动态调试, 该单片机一大特色就是单线背景调试模式和时钟监视部分用于开发支持和运行安全。大多数引脚具有复用功能, 即通用 I/O 功能和特殊接口功能, 这些具有复用功能的端口和控制逻辑全部集成在单片机的内部, 因此具有体积小、功耗低、可靠性高和应用简单的特点。该单片机内部程序存储器 Flash 可以用作保存软件代码和测控原始数据其容量达 256 KB; 12 KB 的 RAM 存储器可以用于堆栈设置、保存中间零时变量以及动态运行数据信息, 甚至在软件调试时存放程序; EEPROM 存储器容量为 4 KB, 可以用于设置运行参数、保存组态等需要长期保存信息数据;

收稿日期: 2018-11-28; 修回日期: 2018-12-14。

基金项目: 上海市科技人才项目计划(16QB1402600)。

作者简介: 范伟成(1979-), 男, 江苏灌云人, 高级工程师, 主要从事斯特林发动机控制研究工作。

特有的 BDM 调试方式在没有仿真器条件下就可以实现硬件断点、条件断点和在线调试等全部功能; 内置的看门狗可以保证软件跑飞后快速恢复, 当系统的始终运行异常时, 可以用过时钟监视系统功能进行查看。此外, 该单片机内部集成了 A/D、PWM、SRAM、EEPROM、CAN、Watch-dog 等, 大幅度简化外围电路, 支持在线仿真、调试和编程, 内部总线速率高达 25 MHz, 有工业控制专用的通信模块, 用作数据运算处理和通信可以取得较好的效果。

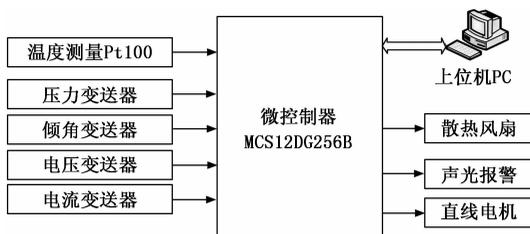


图 1 测控系统框图

测控系统硬件组成有: 以 MC9S12DG256 单片机为核心的控制器、压力测量变送器、温度测量传感器 Pt100、角度测量变送器、直线电机电压电流测量变送器、散热风扇、声光报警和上位机 PC 等。

测控系统工作原理: 图 1 中上位机 PC 主要用于显示自由活塞斯特林制冷机的参数数据状态, 是人机对话窗口, 通过点击上位机 PC 的操作按钮, 向单片机控制器下发例如“开机”、“停机”和“复位”等控制操作, 在上位机 PC 也可设置制冷机的运行参数。单片机控制器用作下位机, 主要用于采集和处理各个传感器信号, 当传感器信号出现异常之时能够提供报警信息; 为了保证制冷机安全可靠运行, 采用反电动势控制策略实现制冷机直线电机行程控制, 采用快速制冷与温度 PID 控制相结合的控制策略实现制冷机冷端温度的控制; 调节和控制直线电机的正常运转, 当直线电机出现异常时能够提供报警信息或者直接发送停机指令; 控制风扇进行散热或驱动报警器进行声光报警; 单片机控制器将制冷机的各个传感器数据信息或报警信息通过串口通讯传送给上位机 PC, 并根据上位机 PC 的控制指令执行相应的控制指令。

1.1 压力测量

压力测量用于测量自由活塞斯特林内部的工质压力, 采用工业控制上常用的电流型两线制压力变送器, 型号为: CS20FUF-5MPa, 该传感器工作电压为 24 VDC, 测量精度为全程程 $\pm 0.2\%$, 输出信号为 4~20 mA。该电流信号通过 249 欧姆精密电阻对地产生最高 4.98 V 的电压信号, 再经过信号调理后进入 MC9S12DG256 单片机的内部 AD 模块进行模数转换。

1.2 温度测量

需要对制冷机的冷端、热端温度以及直线电机温度的实时采集, 这里采用热电阻 Pt100 完成。为了保证测量精度, Pt100 测温使用三线制接法, 如图 2 所示, Pt100 信号采集采用电桥测量方式完成, Pt100 和精密电阻 R_1 、 R_2 、 R

组成测量电桥电路, 其中 $R_1 = R_2$ 且 R_3 为可调电阻, 连接 Pt100 的三根导线 a、b 和 c 等长, 则其导线电阻也基本一致, 可以互为抵消导线电阻引起的测量误差, 进而提高了 Pt100 信号测量准确度。Pt100 在温度变化时其电阻值变化是线性的, 因此图 2 所示的测量电路的输出 $V = V_+ - V_-$ 也是线性的, MC9S12DG256 单片机的内部 AD 采集这个电压就能获得当前制冷机相关测点的温度。

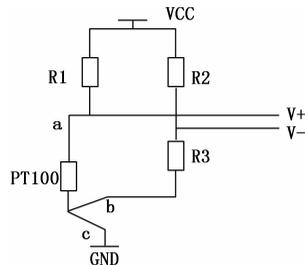


图 2 热电阻三线制测量

1.3 倾角测量

自由活塞斯特林制冷机整体结构较为精密, 运行中如果发生移位而形成一定倾角则可能给制冷机带来损坏, 因此设置了倾角传感器, 当制冷机达到一定的倾角数值, 则报警并停止运行。倾角传感器型号为: HCA526T, 信号输出为 4~20 mA, 同样采用 249 欧姆精密电阻对地产生最高 4.98 V 的电压信号后再经过调理后送给 MC9S12DG256 单片机处理。

1.4 直线电机电压电流测量

直线电机驱动斯特林活塞工作, 形成稳定的工作循环, 达到制冷目的。为了控制斯特林活塞的行程和计算系统的效率需要测量直线电机的电压和电流, 使用的变送器型号分别为 CHZ-50VT/A1 和 CHZ-50G/A1, 为了提高系统的抗干扰性能, 其信号输出均采用 4~20 mA。

1.5 执行器控制

自由活塞斯特林制冷机工作过程中, 需要用散热风扇及时把热端产生的热量带走; 当有异常产生时需要进行声光报警, 在本系统中, 散热风扇和报警器属于执行器, 其控制相对简单, 结合散热风扇和报警器的自身特性和成本考虑, MC9S12DG256 单片机输出指令经过三极管放大后对二者进行驱动控制, 可靠性较高且降低了系统成本。

1.6 直线电机控制

自由活塞斯特林制冷机依靠直线电机的周期性往复运动驱动斯特林机的自由活塞压缩工质, 从而实现热量从冷端向热端的传输, 达到制冷的目的。因直线电机的周期性往复运动则驱动电源必须以周期性方波形式。本系统采用基于 IR2181S 的 MOSFET 全桥结构^[3], IR2181S 芯片电路内部集成了 CMOS 控制电路和由 MOS 管组成的驱动桥, 它能为负载提供 2.3 A 的连续电流。该电路能在 600 V 的供电电源范围内安全工作, 用户只需提供与 TTL 电平兼容的 PWM 信号就可进行 4 象限模式的幅值和方向同时控制, 而且与数字控制器的接口非常简单。直线电机往复运动控

制原理如图 3 所示, 4 个 MOS 管 (M1~M4) 和一个直线电机 (M) 组成的 H 全桥。在图 3 (a) 中, 当 M1 和 M4 导通时, 电流从电源正极经 M1 从左至右穿过直线电机, 然后再经 M4 回到电源负极, 电机沿顺时针转动。在图 3 (b) 中, 当 M3 和 M2 导通时, 电流从右至左流过直线电机, 直线电机沿逆时针转动。因此, 通过调整 MOS 管的导通与截止时序可以控制直线电机的转向, 通过调整流经电机电流的大小可以控制直线电机的转速。本测控系统通过 MC9S12DG256 单片机的 PWM 通道输出方波激励, 驱动 IR2181S 工作, 周期性地开启与关闭 M1—M4、M2—M4 可以达到直线电机驱动功率可控且可靠的要求。

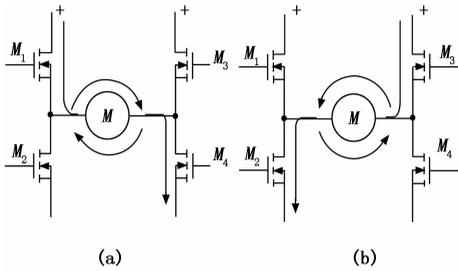


图 3 直线电机控制电路示意图

1.7 上位机 PC

上位机 PC 是人机对话的窗口, 采用国产组态王软件设计完成。由参数数据、控制操作、历史曲线和报警信息等 4 个部分组成, 如在参数数据窗口显示制冷机的温度、功率, 电流和压力; 报警信息记录主要记录制冷机警报类型, 方便分析故障; 历史曲线趋势可以查看制冷机各个参数的运行趋势, 也可用作寿命统计分析。

2 测控策略

自由活塞斯特林制冷机测控策略核心之一是直线电机的行程控制, 要保证行程最大化而避免撞缸并使斯特林机达到最佳效率; 另一个核心策略是温度控制, 是自由活塞斯特林制冷机的核心需求, 其控制精度直接体现制冷机的质量。

2.1 直线电机行程控制策略

自由活塞斯特林制冷机结构非常紧凑, 导致无法直接测量直线电机的行程, 根据有关资料^[4-5], 直线电机的反电动势 (BEMF) 与直线电机的有效行程存在确定的近似线性关系。反电动势的本质是通电线圈在磁场中的运动, 即:

$$BEMF = B \cdot l \cdot v \quad (1)$$

在一定的驱动电压 V_{drive} 下, 反电动势 BEMF 阻碍线圈中电流的增加, 即:

$$V_{drive} = BEMF + I \cdot R \quad (2)$$

其中: I 为线圈中的电流, R 为直线电机线圈的有效电阻。

由式 (1)、(2) 分析可知, 通过实时测量直线电机输入端电流和电压, 则可以推导出在给定的负载条件下的反电动势, 进而得到直线电机的最大行程。

直线电机驱动电压决定了制冷机的效率同时也决定了

制冷机的安全, 增加直线电机驱动电压以使电机驱动斯特林发动机活塞尽可能地压缩工质做功, 但是过大的驱动电压会使活塞行程过大而发生撞缸事故, 因此, 需要避免撞缸事故并使斯特林机达到最佳效率。本系统采用基于直线电机最大行程的闭环反馈式驱动电压调节方法: 实时检测直线电机的最大行程, 对比希望达到的最大行程 S_{max} , 确定 MC9S12DG256 单片机 PWM 波的占空比。

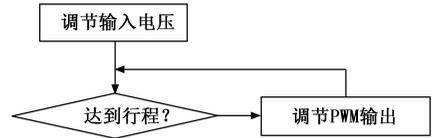


图 4 基于闭环反馈电机驱动电压调节方法

2.2 温度控制策略

温度控制是自由活塞斯特林制冷机的关键控制逻辑, 其温度控制原理如图 5 所示。总体来说, 温度控制需要实现两大基本功能:

1) 快速制冷。即制冷机冷端温度以最快速度达到用户设定的需求温度 (T_d)。该过程一般体现在启动阶段。在该阶段, 需求温度 (T_d) 与实际温度 (T_c) 偏差较大, 当以直线电机的额定最大功率运行, 直至 $abs(T_d - T_c) < T_0$;

2) 温度保持阶段。该阶段要求冷端温度 (T_c) 在 T_d 小范围内波动 ($< 0.5^\circ C$)。在本系统中采用 PID 控温法。以 T_d 与 T_c 之间的偏差 δT 及其变化趋势来调节 PWM 波的占空比 (Duty Cycle), 从而控制直线电机的输出功率, 进而控制系统的制冷量。

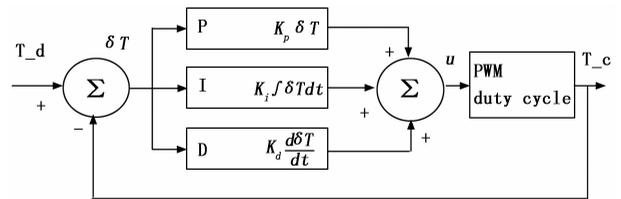


图 5 基于 PID 的温度控制策略原理图

3 软件设计

自由活塞斯特林制冷机测控系统需要处理的任务较多, 要求实时响应的速度较快, 因此, 传统的前后台处理方式不能满足测控系统的实时性和可靠性要求。所以本测控系统引入了嵌入式实时操作系统。 μ COS-II 是专门为嵌入式应用设计的且内核源代码公开的多任务嵌入式操作系统, 具有占用存储空间小、代码执行效率高、可移植性好、可扩展性强和优良的实时性能等特点。所以本系统选择 uC/OS-II 作为系统任务调度内核^[5]。因此, 软件设计主要包括嵌入式操作系统软件设计、基于 uC/OS-II 的 MC9S12DG256 单片机应用软件设计以及上位机 PC 软件设计。

3.1 嵌入式操作系统软件设计

在特定 MCU 上使用 μ C/OS-II 进行软件开发前, 需要进行操作系统移植, 使他能该 MCU 上运行。所以首先

必须进行 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 在 MCU 上的移植。MC9S12DG256 的软件开发基于 CodeWarrior4.7 集成 C 编译平台, 该编译器支持汇编语言程序, 允许用户在 C 源代码中嵌入汇编语言。将 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 嵌入式操作系统移植到 MC9S12DG25 单片机上就是使 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 实时内核能在 CodeWarrior4.7 集成 C 编译平台上运行。移植工作主要主要分为三大步骤: $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 中与文处理器相关代码的修改、与编译器相关代码的修改和应用软件的添加^[6]; 移植工作主要包括以下 5 个方面内容:

1) 用 Typedef 声明与编译器相关的数据类型 (在 OS-CPU.H 文件中), 由于不同的微处理器有不同的字长, 在 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 代码中不能使用 CodeWarrior4.7 集成 C 编译平台 C 语言的 short、int、long 等数据类型, 而采用 INT8U、INT16U、INT32U 等直观又可移植的数据类型来代换相应数据类型。

2) 采用 #define 定义一个常量 OS-STK-GROWTH 的值 (OS-CPU.H), 决定堆栈的填充排列方向, 如果是 1 位则表示堆栈由上向下填充; 如果是 0 位则表示堆栈由下向上填充;

3) 采用 #define 定义说明 3 个宏函数 (OS-CPU.H)。

4) 用 C 语言编写 10 个与 MC9S12DG25 单片机相关的函数 (OS-CPU-C.C)。

5) 定义说明 4 个 CodeWarrior4.7 集成 C 编译平台汇编语言函数 (OS-CPU-A.S)。

3.2 单片机应用软件设计

自由活塞制冷机的主要任务是根据设置的冷端温度, MC9S12DG256 单片机输出一定的 PWM 信号, 驱动直线电机周期运动, 带动斯特林活塞运动, 使冷端温度快速达到设定值。本测控系统采用的控制流程见图 6, 系统上电后, 立即检测系统的各个状态参数, MC9S12DG256 单片机读入设定的运行参数, 依据这些参数, 判断系统是否处于可运行状态, 若系统通过自检, 则立即进入启动过程, 此时, 计算设定温度与冷端当前温度的差值, 如果其差值大于设定的偏差值, 则单片机输出两对相位相差 180° 的 PWM 波, 每对 PWM 波的幅值相同、极性相反, 驱动直线电机运行, 为了避免初始启动电流过大而烧坏直线电机, 系统采用分步升压的方法来起驱动直线电机, 即驱动电压以一定的速率上升, 上升速率根据设定温度与冷端当前温度的差值由单片机决定, 期间, 监测直线电机的行程, 如果直线电机的行程达到设定值, 单片机维持当前直线电机运行状态, 直至设定温度与冷端当前温度的偏差小于 0.5°C 。表明制冷机已经完成目标工作, 此时, 单片机以设定温度与冷端当前温度的偏差变化趋势确定 PWM 波的占空比来调节控制直线电机的工作状态, 进而控制系统的制冷量, 维持当前的温度。

3.3 上位机软件设计

上位机采用工控 PC 机, 使用组态王软件进行设计。上位机主要用于实时收集自由活塞斯特林制冷机的各运行参数, 为后续对整个系统的优化提供分析基础及目标对象。

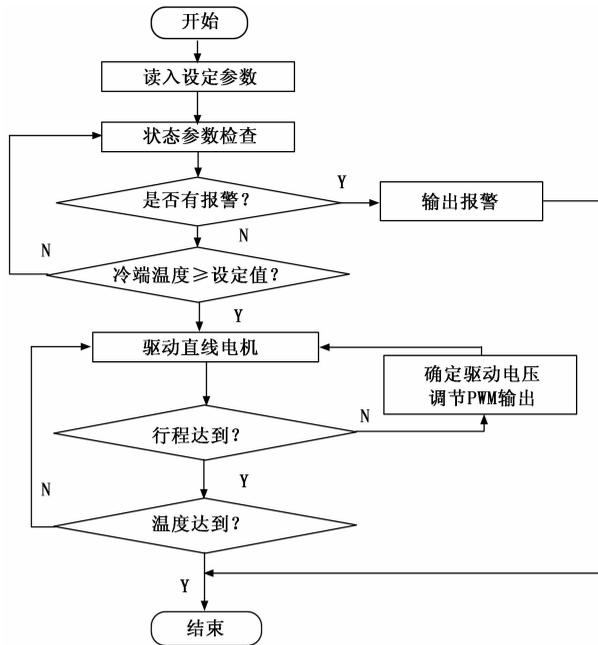


图 6 制冷机控制流程图

因此制冷机运行完全独立于上位机程序, 仅用作数据采集、记录、分析与汇总等功能。

设计完成的上位机监控界面如图 7 所示, 上位机 PC 显示自由活塞制冷机的工质压力和倾斜角度, 直线电机输入端的电压、电流、功率以及直线电机内部温度, 冷端和热端的温度信息; 点击控制操作可以手动调试直线电机、散热风扇以及蜂鸣器; 在参数设置则可以设置制冷机的报警项, 如温度、工质压力、电压和电流等上下限; 历史曲线运行记录保存了自由活塞制冷机的参数运行信息。运行记录的文件按年月日的格式生成, 可以调查查看; 报警信息部分主要显示系统警报及错误信息, 如超温、超压等, 故障记录主要有: 故障代号、故障发生时间以及故障清除时间等; 温度参数设置可以设定制冷机目标运行温度, 点击“写入 EEPROM”, 则把设定的温度数值写入 MC9S12DG256 单片机存储空间且掉电仍然能保存, 控制面板中“开机”“停机”钮实现对制冷机的简单开关机控制, “复位”按钮用于清除当前发生的故障报警。



图 7 上位机监测软件

4 实验结果与分析

研制的基于 MC9S12DG256 单片机的制冷机测控系统在某型自由活塞斯特林制冷机上获得了应用, 在上位机 PC 上设置制冷机的目标冷端温度, MC9S12DG256 单片机驱动直线电机做周期运动, 进而带动斯特林活塞做功, 完成了一系列制冷机的性能是试验, 获得了大量应用数据, 图 8 是制冷机在不同环境温度/制冷温度下的制冷量与制冷系数 (COP) 曲线图, 证明本测控系统达到了预期目标。

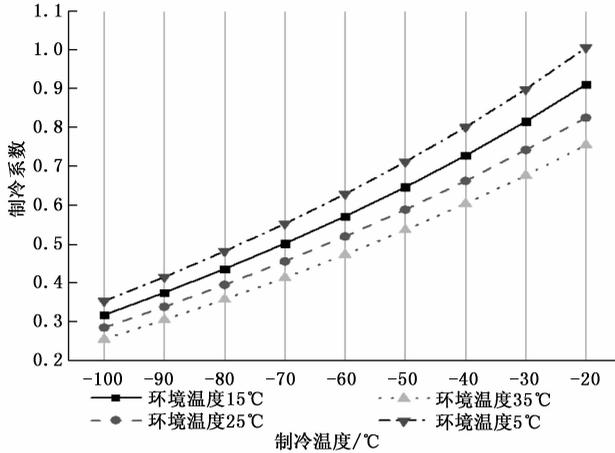


图 8 制冷机的性能曲线

5 结束语

为实现对自由活塞斯特林制冷机的测控, 设计了一款

参考文献:

[1] 陈曦, 武卫东, 张华, 等. 自由活塞斯特林制冷机的研究概述 [A]. 中国制冷学会学术年会 2007 学术年会论文集 [C]. 北京: 《制冷学报》杂志有限公司, 2007: 900-905.

[2] 孙同景. Freescale 9s12 十六位单片机原理及嵌入式开发技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.

[3] 邵贝贝. 嵌入式实时操作系统 uC/OS-II (第二版) [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.

[4] 尚美杰, 李金涛, 柴亮, 等. 直线电机力常数快速测定方法 [J]. 电子工业专用设备 2013, 216: 59-61.

[5] 董顶峰, 黄文新, 卜飞飞, 等. 绕组周向分布圆筒型初级永磁直线电机结构及静态特性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2017, (37): 6180-6189.

[6] 王劲松, 李正熙, 夏旺盛. 嵌入式操作系统 UC/OS-II 的内核实现 [J]. 现代电子技术, 2003 (8): 48-50.

[7] Xie L F, Lin L J, Yin M, et al. A novel surface defect inspection algorithm for magnetic tile [J]. Applied Surface Science, 2016 (375): 118-126.

[8] 蒋红海, 李雪琴, 刘培勇, 等. 铁氧体磁瓦表面典型缺陷检测方法研究 [J]. 西南交通大学学报, 2013, 48 (2): 129-134.

[9] Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton G E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks [A]. International Conference on Neural Information Processing Systems [C]. Curran Associates Inc. 2012: 1097-1105.

[10] Simonyan K, Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition [M]. arXiv preprint arXiv: 1409. 1556, 2014.

[11] Szegedy C, Liu W, Jia Y, et al. Going deeper with convolutions [A]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]. 2016: 1-9.

[12] He K, Zhang X, Ren S, et al. Deep Residual Learning for Image Recognition [A]. Computer Vision and Pattern Recognition [C]. IEEE, 2016: 770-778.

[13] Chollet F, Xception: Deep learning with depthwise separable convolutions [M]. arXiv: 1610. 02357v2, 2016.

[14] 周飞燕, 金林鹏, 董军. 卷积神经网络研究综述 [J]. 计算机学报, 2017, 40 (6): 1229-1251.

[15] 廖辉. 基于轻量化卷积神经网络的人脸检测算法 [D]. 杭州: 浙江大学, 2017.

[16] Song H, Pool J, Tran J, et al. Learning both weights and connections for efficient neural network [A]. Proceedings of the Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS) [C]. Montreal, Canada, 2015: 1135-1143.

[17] Li H, Kadav A, Durdanovic I, et al. Pruning filters for efficient convnets [Z]. arXiv: 1608.08710, 2016.

[18] Wen W, Wu C, Wang Y, et al. Learning structured sparsity in deep neural networks [A]. Proceedings of the Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS) [C]. Barcelona, Spain, 2016: 2074-2082.

[19] Sandler M, Howard A, Zhu M, et al. Inverted residuals and linear bottlenecks: mobile networks for classification, detection and segmentation [M]. arXiv: 1801. 04381, 2018.

[20] Howard A, Zhu M, Chen B, et al. Mobilenets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications [M]. arXiv: 1704. 04861, 2017.

[21] Lin M, Chen Q, Yan S C. Network in network [M]. arXiv: 1312. 4400v3, 2016.

[22] Zhang X Y, Zhou X Y, Lin M X, et al. Shufflenet: an extremely efficient convolutional neural network for mobile devices [M]. arXiv: 1707. 01083, 2017.