

# 不等比例 PWM 脉冲技术在顶部振打器上的应用\*

王 涌, 郑博闻, 王 威  
(浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310032)

**摘要:** 为解决顶部振打器中控制器的精度等问题, 将不等比例脉冲技术应用于顶部振打器中。开展了不等比例 PWM 脉冲技术原理的分析, 建立了占空比和波形之间的关系, 提出了新型的采用不等比例插入技术产生的非均匀 PWM 脉冲的原理和实现方法。在数字式 DC-DC 基础开关电路上对通用的 8 位微处理器和场效应管开关器件进行了评价, 并进行了不等比例 PWM 技术实验验证。研究表明, 非均匀 PWM 脉冲具有明显降低输出平均电压稳态误差的作用, 提高了输出平均电压的精度, 考虑了实际应用中为提高输出精度存在的各种外部综合因素, 给出了合理选择该技术方法的依据。

**关键词:** 稳态误差; 非均匀 PWM 脉冲; 精度

中图分类号: TM46; TH43

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)12-1473-05

## Application of inequality proportion PWM impulse in top magnetic shaker

WANG Yong, ZHENG Bo-wen, WANG Wei

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of the accuracy of pulse in top magnetic shaker, the inequality proportion PWM impulse was investigated. After the analysis of inequality proportion PWM impulse, the relationship between duty cycle and waveform was established. A method was presented to the fundament and implementation method of the non-uniform pulse width modulation impulse. The universal 8-bit microcontroller and FET switching device were evaluated on the basis of the block diagram of digital DC-DC switched circuit, the inequality proportion PWM impulse technique were tested. The experimental results show that the theory is correct. Lastly, to practical application, the different exterior composite factor is analyzed, and the ways to select the new technique with appropriately are supplied.

**Key words:** steady-state error; non-uniform pulse width modulation(PWM) impulse; accuracy

## 0 引 言

电除尘器是当前工业环境控制中最有效的除尘手段。电除尘的工作原理是利用电能产生几十万伏的负高压电场, 同时电场又根据需要分为多电场级连的形式, 带粉尘的工业废气以一定的温度和速度逐次流过各电场时, 微小粉尘带上负电荷, 在每一个电场的后端有多块阳极板或阳极线, 根据正负相吸原理, 带电粉尘就会被牢牢吸附在阳极板或阳极线上, 从而起到清灰的效果。伴随着除尘的进程, 在阳极板或阳极线上的粉尘层会不断变厚, 削弱阳极吸附性, 将严重影响后续废气的除尘效率, 传统工业中采用的方法是

用顶部电磁振打器振打阳极板或阳极线, 将吸附在上面的粉尘层以结块的形式, 振落到下部的灰尘回收负压槽中。振打清灰如果作用太强, 将会使已经结块的粉尘再次被击碎, 导致“二次飞扬”, 如果振打清灰太弱, 则无法有效地将粉尘结块振落到回收负压槽中, 由此可见清灰振打技术的研究是十分必要的, 清灰效果的好坏将直接影响除尘的效率。

粉尘吸附力和“反电晕”振打清灰消除需要较高精度的振打加速度, 对振打加速度的控制实际上是对顶部振打器定子线圈的控制, 定子线圈属于大感性负载, 在电力电子技术发展中目前普遍采用的是 PWM 控制方式, 为了进一步提高控制系统的稳态性能, 本

收稿日期: 2011-05-26

基金项目: 浙江省科技支撑和引导资助项目(2008C21096)

作者简介: 王涌(1975-), 男, 浙江嵊州人, 博士, 副教授, 主要从事嵌入式系统应用方面的研究. E-mail: wy@zjut.edu.cn.

研究在控制实现方法上提出新型非均匀 PWM 脉冲控制技术,采用调节步距更小的占空比脉冲技术以提高谐振控制器的控制精度。

### 1 问题的提出

本研究提出了一种按时间分段的 PWM 脉冲产生的方法,采用该方法可以使微处理器产生的 PWM 脉冲不但具有较高的输出开关频率而且具有比较高的脉冲精度。该技术的特点是在不依赖微控制器的运算速度和位数下产生较高的 PWM 脉冲精度。

PWM 技术的本质是脉冲的占空比控制,按照冲量面积相等原理,利用速度较高的开关控制达到了同样的控制效果<sup>[6]</sup>。在工业现场的大量嵌入式应用系统中,微处理器的主频往往不会很高,采用传统的 PWM 产生技术往往很难产生理想精度的 PWM 脉冲<sup>[7-11]</sup>。这里将传统的 PWM 脉冲称为均匀 PWM 脉冲(如图 1 所示),在整个时间段内,该脉冲的占空比是恒定不变的。连续均匀的 PWM 单脉冲串如图 2 所示。

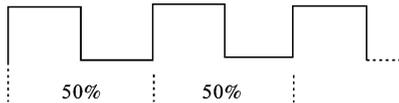


图 1 均匀 PWM 脉冲



图 2 连续均匀单脉冲串

### 2 理论分析和实现

#### 2.1 等比例脉冲插入技术

在考虑负载电流连续的情况下,即满足电流连续条件 PWM 脉冲所需要的最低频率,在均匀 PWM 脉冲中,每对应一个周期脉冲加入一个不同占空比的同频率 PWM 脉冲,如图 3 所示,假设原均匀 PWM 脉冲的占空比是  $D_1$ ,周期是  $T$ ,新加入的 PWM 脉冲占空比是  $D_2$ ,周期也是  $T$ 。微处理器产生每一个占空比是  $D_1$  的脉冲后插入一个占空比是  $D_2$  的脉冲,且  $D_1 \neq D_2$ ,这组占空比不均匀的脉冲组成了一个新脉冲串,新脉冲的周期是  $2T$ ,新脉冲串的占空比  $D$  按下式计算:

$$D = \frac{D_1 \times T + D_2 \times T}{2T} \times 100\% = \frac{1}{2} (D_1 + D_2) \quad (1)$$

式中: $D$ —PWM 脉冲占空比,%; $T$ —脉冲周期,s。

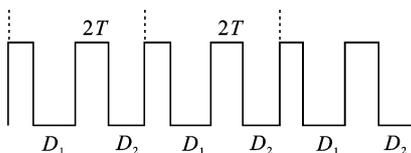


图 3 等比例脉冲串

对于开关管而言,开关的频率仍然是  $1/T$ ,没有提高开关管的负担,但是脉冲串的占空比产生了变化。

本研究假设原均匀脉冲的占空比是 60%,新插入的脉冲占空比是 61%,按式(1)计算,新脉冲的占空比  $D$  为 60.5%。假设微处理器产生的 PWM 脉冲周期是  $100 \mu s$ ,单字节指令周期是  $1 \mu s$ ,该处理器可以产生最小为 1%的占空比脉冲,脉冲的步进也是 1%,如果直接让微处理器产生 0.5%占空比的 PWM 脉冲是困难的,除非提高微处理器的主频。可以看出,通过上述方法,在不需要提高微处理器性能的前提下,很容易地达到了平均占空比精度为 0.5%的输出脉冲。

进一步分析,如果在每个均匀脉冲后面进一步加入占空比是  $D_3, D_4$  等的单脉冲,本研究就可以得到更细分的占空比步进值,而开关管的开关速度也不需要提高。一般有:

$$D = \frac{D_1 \times T + D_2 \times T + \dots + D_n \times T}{nT} \times 100\% = \frac{D_1 + D_2 + \dots + D_n}{n} \quad (2)$$

其中: $n=1, 2, 3, \dots$ ,考虑到软件编程的复杂性,一般  $n=2$ 。

#### 2.2 不等比例脉冲插入技术

PWM 脉冲经过隔离和驱动后直接作用在功率开关管上,通过调节负载平均电压的方式来控制负载。因此,PWM 信号的平均脉宽占空比调节步距越小,负载平均电压的调节精度也就越高。在不等比例脉冲实现技术中,以 10 个脉冲作为一串信号,也就是把频率相同占空比不等的 PWM 脉冲串作为一个新脉冲周期信号,得到的平均占空比作为研究对象,如图 4 所示。

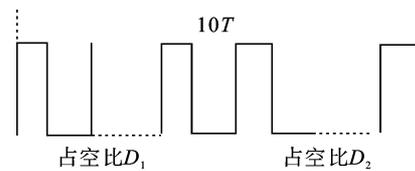


图 4 不等比例脉冲串

在该脉冲串中,平均占空比为:

$$D = \frac{D_1 \times T \times n_1 + D_2 \times T \times n_2 + \dots + D_{10} \times T \times n_{10}}{10T} \times 100\% = \frac{n_1 D_1 + n_2 D_2 + \dots + n_{10} D_{10}}{10} \quad (3)$$

其中: $n_1 + n_2 + \dots + n_{10} = 10, n$  为整数;当  $n_1 = n_2 = n_3 = \dots = n_{10} = 1$  时,即为等比例脉冲插入技术,可以看出等比例脉冲插入技术实际是不等比例脉冲插入技术的特例。

本研究假设 10 个脉冲的占空比分别是 60%, 61%, 62%, 63%...69%, 相应  $n$  的值分别为: $n_1 = n_3 = n_4 = n_5 = 1, n_2 = 2, n_6 = 4, n_7 = n_8 = n_9 = n_{10} = 0$ ,按式(3)计算,新脉冲串的平均占空比  $D$  为 63.1%。同样假设微处理器产生的 PWM 脉冲周期是  $100 \mu s$ ,单字节指令周期是  $1 \mu s$ ,

该处理器最小可以产生 1% 的占空比脉冲, 脉冲的步进也是 1%, 如果直接让微处理器产生 0.1% 占空比的 PWM 脉冲是困难的。可以看出, 本研究采用上述方法, 在不需要提高微处理器性能的前提下, 同样很容易地达到了平均占空比精度为 0.1% 的输出脉冲。

直接去计算每个占空比脉冲数是比较麻烦的, 也没有必要。不等比例脉冲插入技术的有效应用在于反向设计占空比法。

本研究首先定义一个期望占空比为  $S.V\%$ , 该期望平均占空比的精度是  $0.1\%$ , 设计中以 10 个脉冲作为一个新的脉冲串, 即一个新的周期脉冲, 该新脉冲串的平均占空比是  $D$ , 根据式(3), 有:

$$D = \frac{(S+1)\% \times V \times T + S\% \times (10-V) \times T}{10T} \quad (4)$$

从式中可以发现, 在该脉冲串中, 只要产生  $V$  个  $(S+1)\%$  占空比的脉冲以及  $(10-V)$  个  $S\%$  占空比的脉冲就可以达到  $S.V\%$  平均占空比的脉冲串。

基于以上的思想, 如期望得到  $45.2\%$  平均占空比的脉冲串, 假设每个 PWM 脉冲的频率为  $10\text{ kHz}$  (满足续流的条件), 实现的方法是: 把 10 个  $10\text{ kHz}$  的 PWM 脉冲作为一个新的周期脉冲, 在该脉冲串的前 2 个脉冲由微处理器产生  $46\%$  占空比的脉冲, 后 8 个脉冲由微处理器产生  $45\%$  占空比的脉冲, 按照式(3), 有:

$$D = \frac{(45+1)\% \times 2 \times T + 45\% \times (10-2) \times T}{10T} \times 100\% = 45.2\% \quad (5)$$

其实就是期望占空比的整数位占空比产生 10 减小数位值的脉冲个数, 组合整数位加 1 占空比产生小数位值的脉冲个数, 这样构成的新脉冲串就达到了期望占空比。

进一步分析, 假设期望的脉冲占空比精度如果需要达到  $0.01\%$ , 则本研究只要把 100 个脉冲作为一个新的脉冲串就可以了。假设期望得到  $68.12\%$  平均占空比的脉冲串, 把 100 个  $10\text{ kHz}$  的 PWM 脉冲作为一个新的周期脉冲串, 在该脉冲串的前 12 个脉冲由微处理器产生  $69\%$  占空比的脉冲, 后 88 个脉冲由微处理器产生  $68\%$  占空比的脉冲, 按照式(4), 有:

$$D = \frac{12 \times 69\% \times T + 88 \times 68\% \times T}{100T} \times 100\% = 68.12\% \quad (6)$$

该脉冲串的平均脉冲占空比为  $68.12\%$ , 达到了  $0.12\%$  占空比的精度。显然对于微处理器而言, 同样每次只要产生  $1\%$  精度的占空比脉冲就可以实现  $0.12\%$  平均占空比的精度等级, 不需要给微处理器增加额外的负担。在这组 100 个脉冲作为一个周期的脉冲串中, 好像是周期扩大了 100 倍, 可能会影响开关管的开关频率, 从而影响输出电流的连续性, 实际上, 对于

每一个小的脉冲, 开关管开关一次, 开关管的开关频率仍然是  $10\text{ kHz}$ , 不会影响电流的续流和开关管的寿命。

需要指出的是, 并不是期望得到的平均占空比精度在实际中就可以得到该精度的占空比, 实际情况下会受到开关管器件特性、输入直流电压纹波系数和输出滤波电路的影响, 所以不可能在实际电路测试中得到非常高的线性精度。

### 3 实验验证

#### 3.1 数字式开关电源的设计

DC-DC 开关变换电路应用中, PWM 波形是通过三角波和基准直流电压比较而产生的, 占空比和输出电压基本是线性关系, 如图 5 所示, 采用模拟式 DC-DC 开关电路具有速度响应快的特点, 但是电路显得复杂。如图 6 所示, 如果将模拟式开关电路结构图中虚线部分采用如图数字微处理器代替, 在不增加系统成本和复杂度的情况下, 采用插入脉冲软件技术产生的非均匀 PWM 波形, 可以得到线性精度更高的输出平均直流电压, 当然在系统闭环响应方面将略低于模拟系统。

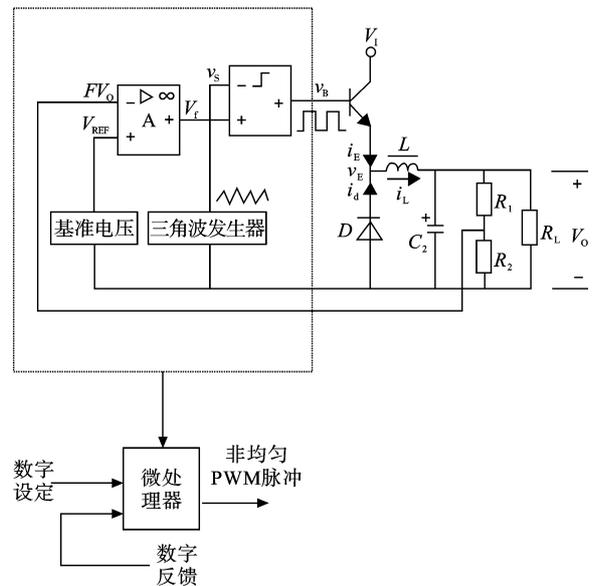


图 5 模拟式 DC-DC 开关电路结构图

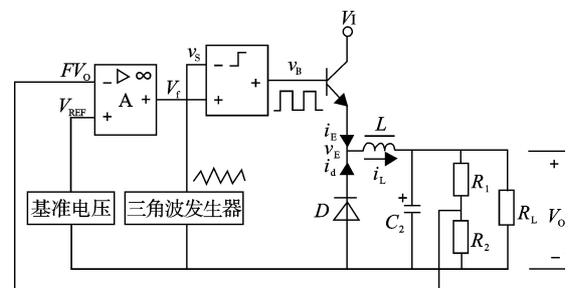


图 6 数字式 DC-DC 开关电路结构图

#### 3.2 实验验证和分析

实验电路图如图 7 所示, 通用微处理器选用 8 位

的 89C52RD+, 晶振采用 24 MHz, 微处理器产生频率恒定为 20 kHz 的 PWM 脉冲信号。本研究采用两个具有优先级的软件定时器, 设置不同的定时时间常数, 采用不等比例脉冲插入技术, 输出占空比不均匀的脉冲串。本研究测试了 4 组平均占空比精度保留到小数点后 1 位的脉冲信号。电枢外加电压为 10 V, TLP250 为场效应管驱动隔离接口, IRF460 为场效应开关管, L 为负载, 测试数据如表 1 所示。

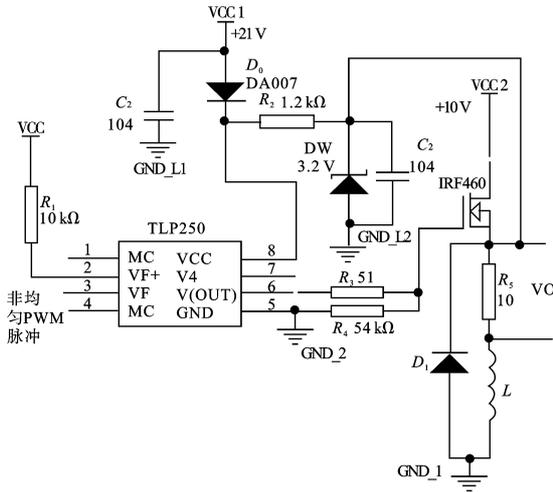


图 7 实验设计电路图

表 1 非均匀 PWM 脉冲串作用下的输出平均电压

| 实验 | 平均占空比 $D$ / (%) | 输出平均电压 $U$ / V | 相对误差 $\delta$ / (%) |
|----|-----------------|----------------|---------------------|
| 1  | 38.5            | 3.82           | 0.78                |
| 2  | 44.9            | 4.45           | 0.89                |
| 3  | 52.7            | 5.24           | 0.57                |
| 4  | 63.2            | 6.28           | 0.63                |

由表 1 的数据可以看出, 本研究通过利用非均匀 PWM 的脉冲串使平均占空比的精度得到明显的提升, 实际由于电感电阻以及场效应开关管导通非线性电阻、续流二极管的特性影响等因素, 再加上测量误差和系统误差, 不可能精确地得到理论上的平均电压输出值, 但是, 从结果看, 所有的误差控制在 1.0 % 以内, 实际的效果是比较好的。实验中二极管  $D_2$  两端得到的脉冲波形如图 8 所示,  $V_o$  两端得到的平均电压波形如图 9 所示。

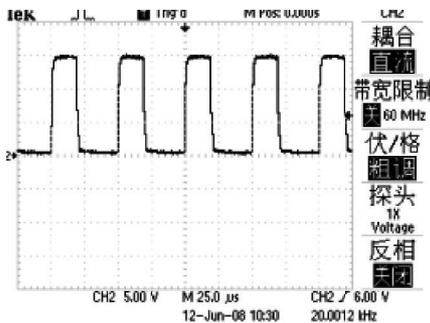


图 8 平均占空比 38.5 % 的脉冲波形图

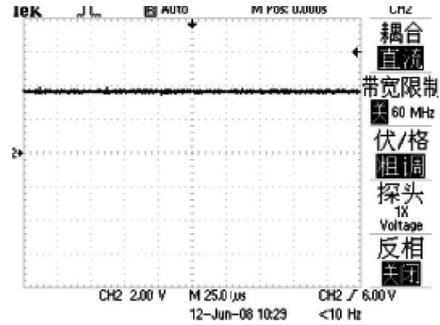


图 9 平均占空比 38.5 % 的输出平均电压

以表 1 中的实验 3 为例说明, DC-DC 变换中, 常规 PWM 脉冲的占空比是以 1 % 步进的, 占空比按照 51 %、52 %、53 % 前进, 无法得到 52.7 % 占空比的中间值, 更得不到相应的输出电压了, 本研究采用不等比例插入新技术后, 输出的平均电压步进得到了细分, 这样在负载上就可以得到更小的稳态误差了。平均占空比 52.7 % 的脉冲波形图和输出平均电压如图 10、图 11 所示。

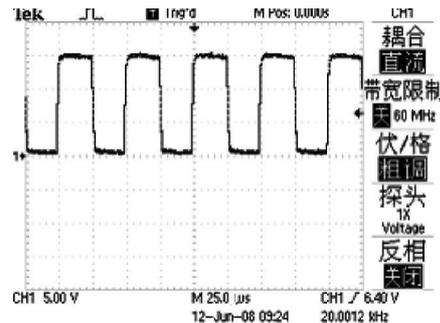


图 10 平均占空比 52.7% 的脉冲波形图

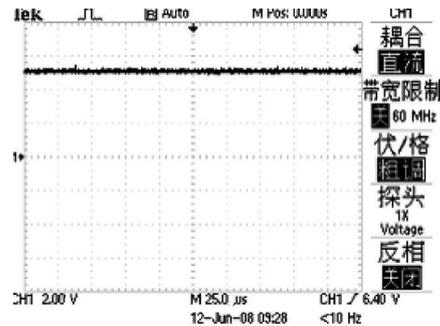


图 11 平均占空比 52.7% 的输出平均电压

### 4 工业应用

经过单元实验和系统联机调试, 最后设计的样机控制柜如图 12 所示。

本研究对整个系统在电网扰动下对振打高度进行了实验测试, 电网扰动采用 5 kW 自耦调压器模拟, 振打锤高度测量采用顶部钻孔引出刚性细铁丝方式, 细铁丝的高度变化采用数字式光电读数器测量。实验测试装置示意图如图 13 所示。



图 12 控制柜样机

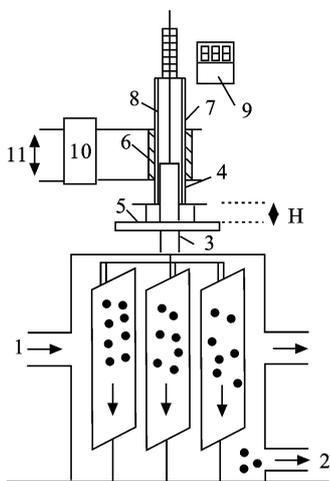


图 13 实验测试装置

1—电离粉尘;2—吸收粉尘;3—陶瓷;4—振打锤;5—底座;6—线圈;7—外壳;8—内筒;9—数字式光电计数器;10—控制装置;11—电网

传统工业采用的方法是用顶部电磁振打器振打阳极板或阳极线,将吸附在上面的粉尘层以结块的形式,振落到下部的灰尘回收负压槽中。顶部振打器通过控制器控制顶部的振打锤振打吸尘极板,振打锤通过击打陶瓷接口传递振打加速度到收尘极板,从而使粉尘脱落。由于极板接口的陶瓷极容易震碎以及振打二次飞扬的避免,顶部振打器的电流控制要求十分精确,一般要求是 0.01 A,所以采用这种 PWM 控制方式很好地解决这个单一的这个这个问题。在考虑节能方式和材料成本的基础上,本研究提出了 PWM 脉冲技术在顶部振打器中的应用。

## 5 结束语

本研究通过对新型不等比例 PWM 脉冲产生技术原理的分析,并结合 DC-DC 控制系统设计了实验电路,实验结果表明采用新的技术可以在一定程度上提高输出平均电压的精度,可以得到如下结论:

(1) 本研究通过实验验证了不等比例 PWM 脉冲

技术方法在顶部振打器的可行性,通过控制器精确控制顶部振打器的振打锤,高效地击打除尘极板,提高除尘的效率,同时,能减少对陶瓷极的损耗。

(2) 该技术通过微处理器的两个定时器中断实现,也就是利用一般处理器所具有的资源,解决了工业现场存在的问题,提高了系统的性价比,在除尘领域,具有很高的应用价值。

(3) 本研究采用等比例插入和不等比例插入技术能有效提高输出平均电压的稳态误差。等比例插入技术是不等比例插入技术的一种特例。

(4) 需要指出的是,虽从理论上讲本研究可以实现 PWM 占空比的调节步进精度达到 0.01%及以上,但是由于实际开关器件(场效应管和续流二极管)特性限制、负载电感的电阻等因素的存在,实际无法得到精度非常高的输出电压。

(5) 在 DC-DC 控制中,本研究采用数字式软件方法产生非均匀 PWM 脉冲将可能降低闭环控制系统响应的快速性,所以要根据控制器性能指标的要求,在同时兼顾稳态误差和响应快速性要求下有选择地进行。

## 参考文献(References):

- [1] 洪乃刚. 电力电子技术基础[M]. 北京:清华大学出版社, 2008.
- [2] 于海生. 微型计算机控制技术[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.
- [3] 贾立新,王 涌. 电子系统设计与实践[M]. 北京:清华大学出版社, 2007.
- [4] 米根锁. 在 8031 单片机应用系统中实现 PWM 的方法[J]. 电气传动自动化, 2006, 28(5): 52-53.
- [5] 张 程, 翁惠辉. 极压仪中直流电动机 PWM 调速下开关频率的选取[J]. 石油仪器, 2006, 20(5): 14-16.
- [6] 贾玉瑛, 王 臣. 基于单片机控制的 PWM 直流调速系统[J]. 包头钢铁学院学报, 2005, 24(4): 334-337.
- [7] 刘刚立. 全数字化双闭环可逆直流 PWM 调速系统设计[J]. 中国测试技术, 2006, 32(5): 110-112.
- [8] 李铁才, 杜坤梅. 电机控制技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2000.
- [9] 周顺荣. 电机学[M]. 北京:科学出版社, 2002.
- [10] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
- [11] 杨 耕, 罗应立. 电机与运动控制系统[M]. 北京:清华大学出版社, 2007.
- [12] 郝文阁, 侯亚平. 基于非稳态静电收尘理论的电除尘器运行参数的研究[J]. 环境工程学报, 2008, 2(3): 378-382.
- [13] 闫东杰, 党小庆. 电除尘器气流分布试验研究和数值计算[J]. 环境工程学报, 2008, 2(3): 383-386.

[编辑:张 翔]