



# 基于步进电机程序控制的自动缫丝机络交机构设计

周桃艮, 姚跃飞

(浙江理工大学材料与纺织学院、丝绸学院, 杭州 310018)

**摘要:** 将程序控制的步进电机作为自动缫丝机络交机构动力源, 设计的络交机构体积较小, 可自主设计络交运动规律, 实现等速导丝。介绍了步进电机程序控制的络交机构运行原理, 分析了该络交机构的一些参数; 在此基础上, 选用型号为 J-4218HB4401 的步进电机对实验室的缫丝平台的络交机构进行重新设计。结果表明: 步进电机程序控制的络交机构, 可以实现等速导丝, 且可得轴向防叠周期大于 5000 次。

**关键词:** 步进电机; 络交机构; 程序控制; 运动规律; 参数分析

**中图分类号:** TS142.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851 (2019) 01-0023-06

## Design of traverse mechanism in automatic silk reeling machine based on stepping motor program control

ZHOU Taogen, YAO Yuefei

(Silk Institute, College of Materials and Textiles, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** When the stepping motor controlled by program was used as power source of traverse mechanism in automatic silk reeling machine, the size of designed traverse mechanism was smaller, the law of traverse motion could be freely designed, and the isokinetic guide silk could be realized. The operation principle of traverse mechanism controlled by the program of stepping motor was described. Moreover, the related parameters of the traverse mechanism were analyzed. On this basis, J-4218HB4401 stepping motor was selected to redesign traverse mechanism of silk reeling model in laboratory. The results showed that the traverse mechanism controlled by the program of stepping motor could achieve isokinetic guide silk, and the overlapping cycles at the axial direction exceeded 5000 times.

**Key words:** stepping motor; traverse mechanism; program control; law of motion; parametric analysis

### 0 引言

缫丝时小簇丝片的卷绕运动是由小簇的回转运动和络交机构的往复运动组成的, 自动缫丝机的络交机构一般是采用两种或多种运动复合而成的复式络交运动<sup>[1]</sup>。目前, 主流的络交机构为周转轮系平板凸轮络交机构<sup>[2-4]</sup>, 其络交运动由三种运动复合而成, 丝条卷绕轴向重叠周期长, 具有丝片成形良好、易干燥的优点, 而且该机构运行平稳, 能适应高速缫丝<sup>[4]</sup>。

笔者在搭建自动缫丝机实验平台时发现, 生产系统用的周转轮系平板凸轮络交机构, 因体积较大等原因, 不适用于实验平台; 另外, 周转轮系平板凸轮络交机构还不能完全实现等速导丝<sup>[5-6]</sup>, 其络交运动规律还存在着可改善的空间; 机械式络交机构的络交运动方式已固定, 不适合在实验室中研究新的络交运动方式。因此, 本文研制了一种由单片机程序控制的步进电机作为动力源的新型络交机构。该络交机构的机械结构简单、体积较小, 可实现等速导丝, 通过

计算机程序的改变可实现不同的络交运动方式。

## 1 步进电机程序控制的络交机构结构原理

步进电机程序控制的络交机构的控制流程示意如图 1 所示,控制中心为单片机,通过单片机发送信号给驱动器,控制步进电机带动络交杆运动。

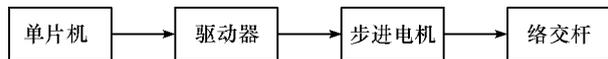
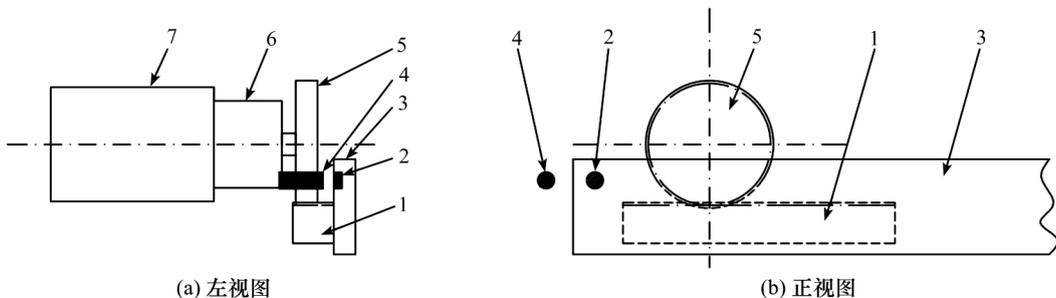


图 1 控制流程示意

图 2 是本络交机构的结构示意,其中 1 为齿条,2 为永磁铁,3 为络交杆,4 为霍尔传感器,5 为齿轮,



(a) 左视图

(b) 正视图

1—齿条;2—永磁铁;3—络交杆;4—霍尔传感器;5—齿轮;6—行星齿轮减速器;7—步进电机

图 2 步进电机络交机构结构示意图

## 2 络交运动分析

步进电机是利用电磁铁原理将电脉冲信号转换成角位移或线位移的开环控制电机<sup>[7]</sup>,可根据脉冲信号精确控制行程、运动方向、速度和定位<sup>[8]</sup>,因此络交机构采用步进电机为动力源,可实现各种不同的运动规律,从而产生不同的络交运动方式。在设计络交运动时,可以利用编程来控制络交机构两端的停放曲线和步进电机速度,以优化络交方式。

因为步进电机带动齿轮齿条直接控制络交杆直线往复运动,所以当步进电机速度恒定时,络交杆运动速度也恒定,从而实现等速导丝。按照步进电机速度的变化和传统络交机构复式络交运动的分类<sup>[9]</sup>,可以将该络交机构运动规律分为下述三类。

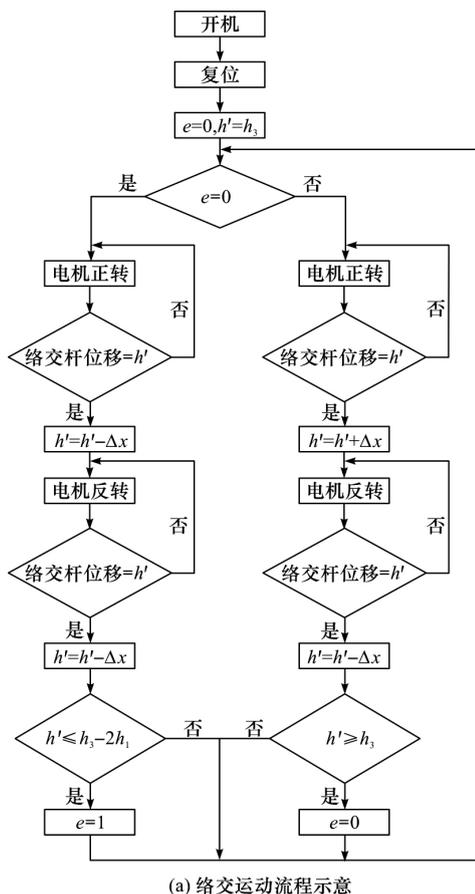
### 2.1 步进电机转速恒定,络交中心不变,络交动程呈周期性变化

该络交运动的流程示意图和规律示意分别如图 3(a)和图 3(b)所示,其中  $S_i$  为络交运动周期,  $h_1$  为络交运动振幅,  $h_3$  为络交运动总动程,  $\Delta x$  为运动变化单位,  $e$  为络交动程变化标识参数,  $h'$  为实时络交运动动程。图 3(b)中正下方对应的梯形为小瓮丝片截面形状图(理论上),  $i, j$  为阶段 I、

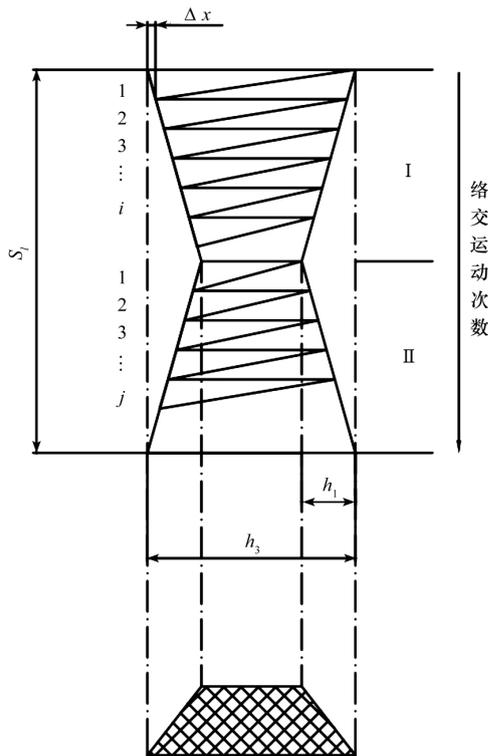
II 的络交运动次数,可以看出络交运动动程随着络交运动次数的变化而变化。当  $e=0$  时,  $h'$  逐渐减小,此时每完成一次络交运动,步进电机使络交杆在两端的停放点依次向内侧靠近一个单位  $\Delta x$  (阶段 I),当  $h'$  和络交运动的主运动区宽度  $h_3 - 2h_1$  相等时,令  $e=1$ 。当  $e=1$  时,  $h'$  逐渐增大,此时每完成一次络交运动,步进电机使络交杆在两端的停放点再依次向两端增加一个单位  $\Delta x$  (阶段 II),当  $h'$  和络交运动最大宽度  $h_3$  相等时,  $e=0$ , 以此往复。

在实际应用时,为了防止步进电机过冲,可适当减小图 1 中齿轮 5 的直径、增大行星齿轮减速器 6 的减速倍数,以尽量减少络交杆惯性对步进电机的影响;同时还需选择合适的步进电机的精度、速度、静力矩和步进电机驱动器的精度等参数,尽量减少步进电机产生过冲的因素。

在实际的缫丝中,设定步进电机的运动为有规律的正反转。当步进电机的转速恒定时,整个络交杆呈规律性的直线往复运动且速度不变,因此可以实现等速导丝。丝片的卷绕角基本不变,最终丝片的成形从丝层数上看应为标准的梯形,不会出现两边高中间低的马鞍形,利于丝片成形稳定和厚度的增加。



(a) 络交运动流程示意



(b) 络交运动规律示意

图 3 络交运动规律(一)

2.2 步进电机转速恒定, 络交行程不变, 络交中心呈周期性变化

该络交运动的流程示意和规律示意分别如图 4(a) 和图 4(b) 所示, 图 4(b) 中正下方对应的梯形为小箕丝片理论上的截面形状图, 图中纵向为络交运动次数, 可以看出络交中心的位置随着络交运动次数的变化而变化。其中  $h_2$  为络交运动动程,  $e'$  为络交中心变化标识参数,  $f$  为图 4(b) 中 I、II 阶段的络交次数计数参数, 其他参数同图 3。由图 4(b) 所示, 在一次络交运动中,  $h'$  会发生变化, 往复分别为  $h_2$  和  $h_2 - \Delta x$  (阶段 I) 或  $h_2 + \Delta x$  (阶段 II)。当  $e' = 0$  时, 络交中心向右侧偏移, 此时每完成一次络交运动, 步进电机使络交杆在两端的停放点依次向右侧靠近一个单位  $\Delta x$  (阶段 I), 当  $f \cdot \Delta x$  和络交运动振幅  $h_1$  相等时, 络交杆右端停放点到达整体络交范围的右边缘, 此时令  $f = 0, e' = 1$ 。当  $e' = 1$  时, 络交中心向左侧偏移, 此时每完成一次络交运动, 步进电机使络交杆在两端的停放点依次向左侧靠近一个单位  $\Delta x$  (阶段 II), 当  $f \cdot \Delta x$  和络交运动振幅  $h_1$  相等时, 络交杆右端停放点到达整体络交范围的左边缘, 此时令  $f = 0, e' = 0$ , 以此往复。最终丝片的成形从丝层数上看也应为标准的梯形。在实际的

应用中, 为了防止步进电机过冲, 也应选择合适的步进电机、步进电机驱动器、齿轮 5、行星齿轮减速器 6 的相关参数。

2.3 其他络交运动规律

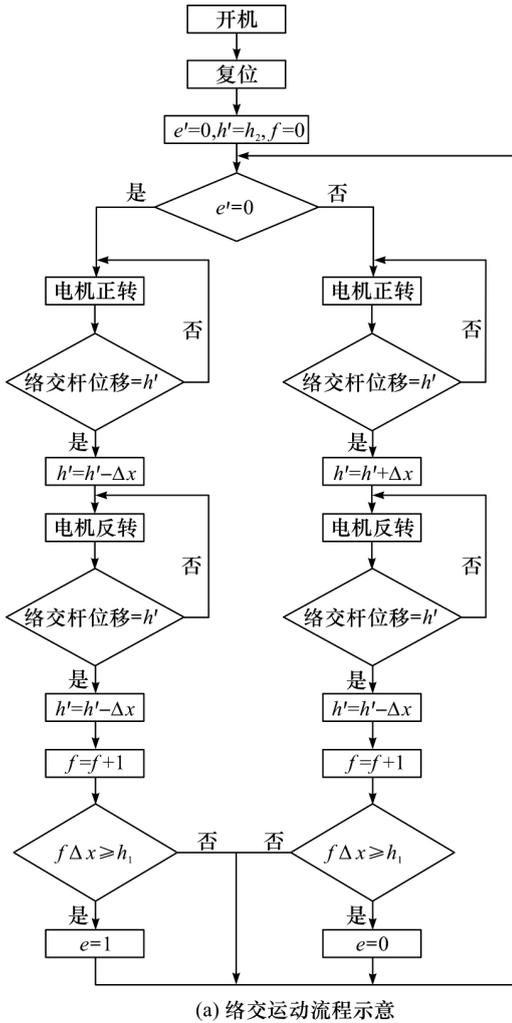
此类络交运动规律可以是 2.1、2.2 所述运动规律的任意叠加, 也可以重新设计络交杆两端停放点的曲线, 依靠编程使步进电机实现运动, 因此可以在等速导丝的基础上, 进一步扩大络交运动轴向重叠周期, 增强防叠效果。

当丝条卷绕到丝片边缘时, 要防止丝片边缘折返时产生重叠高起, 可通过控制步进电机的运动变化使折返的位置变化, 改善丝片成形。当步进电机速度实时变化时, 络交杆运动速度也随之变化, 因此步进电机速度变化的络交运动规律理论上不能实现等速导丝, 但是可以通过控制步进电机的加速度, 使效果接近于等速导丝。在设计运动规律时, 可以使络交杆在靠近两端停放点时逐渐减小速度, 减少直线往复运动切换方向时带来的冲击。

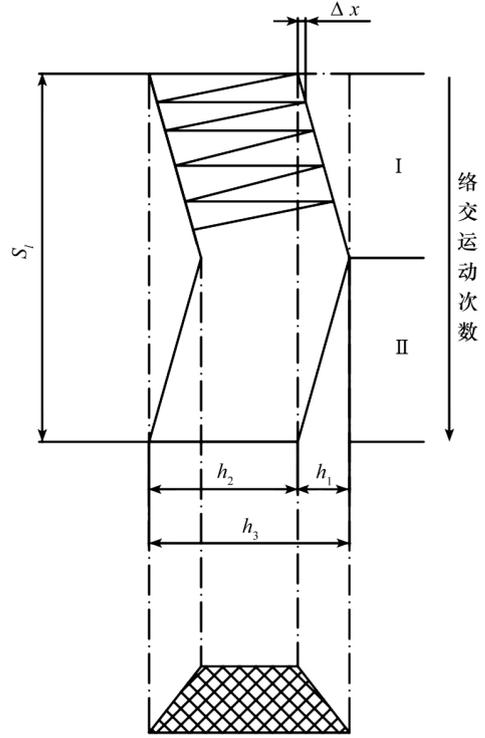
3 参数分析

3.1 箕络速比分析

箕络速比是小箕转速 ( $r/min$ ) 和络交机构往复



(a) 络交运动流程示意



(b) 络交运动规律示意

图4 络交运动规律(二)

速度(次/min)的比值,决定着周向防叠周期。当箕络速比选择不当时,每次络交运动的起始点和终止点为同一点,或者卷绕在小箕上的丝条路径重复过多,这样会导致丝条相互重叠,在小箕表面产生绳带状凹凸不平的现象。重复的丝圈相互嵌入,工人操作时找头弃丝困难,容易产生乱丝,影响质量和产量;产生凸边,将导致成形不稳定;干燥不良,丝胶相互胶着,将影响退绕<sup>[9]</sup>。因此,箕络速比的确定至关重要。

箕络速比和小箕转速、络交机构往复速度(次/min)有关,当步进电机速度恒定时,络交运动动程不同,则络交机构往复速度也不同,因此不同络交运动规律的箕络速比也存在一定的差异。下面对上述2.1和2.2中两种情况的箕络速比做逐一分析。

3.1.1 步进电机转速恒定,络交中心不变,络交动程呈周期性变化

结合图3的运动规律可知,每次络交运动动程变化的单位为 $\Delta x$ ,则当络交运动处于I阶段时,第*i*次络交运动的总路径长 $l_i$ 为:

$$l_i = 2h_3 - (2i - 1)\Delta x \quad (1)$$

同理,当络交运动处于II阶段时,第*j*次络交运动的总路径长 $l_j$ 为:

$$l_j = 2(h_3 - 2h_1) + (2j - 1)\Delta x \quad (2)$$

当步进电机的转速恒定时,假设图2中齿轮1齿距为*m*,齿数为*n*,行星齿轮减速器减速倍数为*a*,则络交机构往复速度 $\omega_l$ (次/min)和步进电机转速 $\omega_0$ (r/min)的关系为:

$$\omega_l = \frac{\omega_0/a}{l_{i(j)}/mn} = \frac{mn\omega_0}{al_{i(j)}} \quad (3)$$

设小箕转速为 $\omega_x$ (r/min),则箕络速比*k*为:

$$k = \frac{\omega_x}{\omega_l} = \frac{a\omega_x l_{i(j)}}{mn\omega_0} \quad (4)$$

将式(1)、(2)代入(4)中,则有:

$$k = \begin{cases} \frac{a\omega_x [2h_3 - (2i - 1)\Delta x]}{mn\omega_0}, & i=0, 1, 2, 3, \dots, \text{阶段 I} \\ \frac{a\omega_x [2h_3 - 4h_1 + (2j - 1)\Delta x]}{mn\omega_0}, & j=0, 1, 2, 3, \dots, \text{阶段 II} \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可知,当小笼转速  $\omega_x$  为恒定值时,箠络速比在 I、II 阶段均为一个单调变化的变值,因此采用此种络交运动规律有较好的周向防叠效果<sup>[9]</sup>。

随着丝片厚度的增加,为了保证丝条线速度的不变,部分自动缫丝机会实时减小小笼转速<sup>[10]</sup>。当小笼转速实时减小时,由式(5)可知,阶段 I 中的箠络速比值是一个逐渐减小的变值;阶段 II 中的箠络速比为一个不确定值,需要根据实际的络交运动变化量  $\Delta x$  和小笼转速  $\omega_x$  的变化量来确定。

### 3.1.2 步进电机转速恒定,络交动程不变,络交中心呈周期性变化

结合图 4 的运动规律可知,此种络交运动规律的动程分别为  $h_2 - \Delta x$  (阶段 I) 和  $h_2 + \Delta x$  (阶段 II),由式(3)可知,其箠络速比为:

$$k = \begin{cases} \frac{a\omega_x(h_2 - \Delta x)}{mn\omega_0}, & \text{阶段 I} \\ \frac{a\omega_x(h_2 + \Delta x)}{mn\omega_0}, & \text{阶段 II} \end{cases} \quad (6)$$

可知当小笼转速  $\omega_x$  为恒定值时,  $k$  在 I、II 阶段均为定值。假设箠络速比  $k$  的整数部分为  $k'$ , 络交机构的周向重叠周期为  $S_z$  (次),  $C$  为任意正整数,则它们之间的关系如下式所示:

$$(k - k')S_z = C \quad (7)$$

由式(7)可知,若要使周向重叠周期  $S_z$  尽量大,箠络速比  $k$  应为无穷小数,且  $k - k'$  (分数表示)的分母应尽量大。

当小笼转速  $\omega_x$  实时减小时,由式(6)可知, I、II 阶段的箠络速比均为逐渐减小的变值,则此种络交运动规律拥有较好的周向防叠效果<sup>[9]</sup>。

### 3.2 络交机构轴向重叠周期分析

丝条在卷绕中发生的重叠现象可以通过周向防叠和轴向防叠两种方法来解决。轴向防叠是指通过复式络交运动,使络交起始点位置在轴向发生周期性变化,图 4 和图 5 中的  $S_l$  指的就是轴向防叠周期。很显然,  $S_l$  越长,防叠效果越好<sup>[9]</sup>。

步进电机传动的络交机构运动规律理论上有无数种,因此其络交运动轴向防叠周期理论上可达无穷大。按照上述 3.1 和 3.2 这两种运动规律来分析,其络交运动轴向防叠周期  $S_l$  和各参数的关系如下式所示:

$$S_l = \frac{2h_1}{\Delta x} \quad (8)$$

细分驱动器能够对步进电机的相电流进行控制,从而达到细分步进电机步距角的目的<sup>[11]</sup>。假

设步进电机运动的最小单位是步距角  $\theta$ , 步进电机驱动器的实际细分数为  $b$ , 可知每个脉冲对应的齿轮 1 (见图 1) 的步进角度为  $\theta/(ab)$ <sup>[12]</sup>, 则每个脉冲对应络交杆移动距离  $\Delta d$  和各参数满足下列关系式:

$$\frac{\theta/(ab)}{360} = \frac{\Delta d}{mn} \quad (9)$$

化简得:

$$\Delta d = \frac{mn\theta}{360ab} \quad (10)$$

即络交运动变化的最小单位为  $\Delta d$ , 可知实际运动变化单位  $\Delta x \geq \Delta d$ 。轴向防叠周期越大,防叠效果越好,当  $\Delta x = \Delta d$  时,轴向络交周期  $S_l$  达到最大。将式(10)代入到式(8)中可得轴向防叠周期最大值为:

$$S_l = \frac{720abh_1}{mn\theta} \quad (11)$$

## 4 实验验证

根据前述设想和分析,在实验室的小型缫丝平台中进行了实验。选用的步进电机型号为 J-4218HB4401, 电机的步距角  $\theta$  为  $1.8^\circ$ ; 驱动器为雷赛 DM542, 最高可达 128 细分, 在实验中设定细分数  $b$  为 32; 减速器减速倍数  $a$  为 3; 传动齿轮为 1 模 45 齿 ( $n$  为 45), 齿距  $m$  为 3.14 mm。按照最常用的周转轮系平板凸轮络交机构, 其络交运动的振幅宽度为 19 mm<sup>[5]</sup>, 即  $h_1 = 19$  mm。以速度恒定, 络交中心不变, 络交动程呈周期性变化的运动规律设计络交运动, 在实现了等速导丝的基础上, 所得轴向防叠周期约为 5163 次。在实际的缫丝作业中, 可通过选择电机、驱动器和齿轮的相关参数, 大幅增加此络交机构的轴向重叠周期。

## 5 结论

步进电机程序控制的络交机构最大的优点是络交运动规律和运动速度可自由设计。本文通过对原理和参数分析的基础上, 选用了型号为 J-4218HB4401 的步进电机设计改装现有的络交机构, 通过控制步进电机速度, 不但实现了等速导丝, 且所得轴向防叠周期大于 5000 次。由于设计改装的络交机构结构简单, 体积相对较小, 既适用于实验室环境的小型自动缫丝机试验平台上, 还可以通过选择电机、驱动器和齿轮的相关参数, 应用于缫丝、复摇等生产中。

**参考文献:**

- [1] 白伦.长丝工艺学[M].上海:东华大学出版社,2011:105.
- [2] 杭州纺织机械厂,杭州新华丝厂.自动缫丝机理论与管理[M].北京:纺织工业出版社,1985:159.
- [3] 钱有清.自动缫丝机保全保养工技术培训教材[M].北京:中国纺织出版社,2010:20-21.
- [4] 徐作耀.中国丝绸机械[M].北京:中国纺织出版社,1998:64-65.
- [5] 徐作耀.自动缫丝机络交机构运动规律图解分析[J].纺织学报,1984,5(7):23-28.
- [6] 钱永年,杨礼直.应用反平行四边形机构改进自动缫丝机络交装置性能[J].江苏丝绸,2001(6):1-5.
- [7] 邢然,郑国昆,任晓伟,等.步进电机加减速曲线设计方法研究[J].工程建设与设计,2018(6):48-49.
- [8] 魏印龙,张向阳,孔令扬.基于 AT89C51 单片机的步进电机控制系统设计[J].科技广场,2016(8):184-189.
- [9] 苏州丝绸工学院,浙江丝绸工学院.制丝学(下)[M].北京:中国纺织出版社,1993:192-193.
- [10] 许才定,孔育国.中日两国缫丝机发展简史与差距简析(下)[J].国外丝绸,2005(6):18-22.
- [11] 梁伟.基于单片机的步进电机细分驱动系统设计[J].中国设备工程,2017(11):70-72.
- [12] 唐立.步进电机细分驱动系统设计[J].机电信息,2017(27):90-91.

(责任编辑:刘国金)