

伺服压力机柔性加减速控制算法*

宋清玉^{1,2} 郭宝峰¹ 李 建² 殷文齐²

(1. 燕山大学机械工程学院, 秦皇岛 066004; 2. 一重集团大连设计研究院有限公司, 大连 116600)

摘要: 提出了一种伺服电动机柔性加减速控制算法, 采用2个不同周期的三角函数叠加作为伺服电动机加减速构造函数, 加减速所需的转矩与伺服电动机特性更好地匹配, 能够降低系统对伺服电动机功率的要求。推导了伺服电动机位移、速度、加速度和加加速度数学表达式, 并与三角函数加减速控制算法进行了比较。实验结果表明, 该算法能够应用于伺服压力机加工工艺曲线规划设计。

关键词: 伺服压力机 伺服电动机 柔性加减速 控制算法

中图分类号: TG301; TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)06-0269-05

Flexible Acceleration and Deceleration Control Algorithm for Servo Press

Song Qingyu^{1,2} Guo Baofeng¹ Li Jian² Yin Wenqi²

(1. College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China

2. Dalian Design and Research Institute Co., Ltd., CFHI, Dalian 116600, China)

Abstract: A flexible acceleration and deceleration control algorithm of the servo motor was proposed, in which the two trigonometric functions of different cycles were used to construct the acceleration and deceleration function. This algorithm could better match with the servo motor's characteristics, and reduce the requirement of servo motor power. The calculation formulas of displacement, velocity, acceleration and jerk of the servo motor were derived. The performance of this algorithm was compared with the trigonometric function acceleration and deceleration control algorithm. The experimental results showed that this algorithm could be applied to plan the drawing profiles for the servo press.

Key words: Servo press Servo motor Flexible acceleration and deceleration Control algorithm

引言

伺服压力机是采用伺服电动机作为动力源的一种智能化压力机, 其滑块运动特性可控, 工作性能和工艺适应性大大提高, 在冲压成形领域具有广阔的应用前景^[1-3]。伺服电动机加减速控制算法是实现伺服压力机高速、运行平稳和高柔性的关键^[4], 因此国内外学者提出了各种加减速控制算法^[5]。目前伺服控制系统中常用的加减速算法主要有直线加减速、指数加减速、S形曲线加减速和三角函数加减速等^[6-7]。前两种加减速算法计算简单、速度快, 但由于加速度不连续, 引起驱动力突变, 会对系统产生柔性冲击, 因而常用于经济

型数控机床中^[8]。后两种加减速算法在高档数控机床中应用较为广泛, 采用S形曲线加减速控制算法, 速度和加速度均变化连续, 在整个加减速过程中避免了柔性冲击, 但加加速度变化不连续, 柔性受到限制^[9]。采用三角函数加减速控制算法, 速度、加速度和加加速度均变化连续, 系统运行平稳, 柔性较高^[10]。

本文以伺服压力机为研究对象, 提出一种伺服电动机柔性加减速控制方法, 采用2个不同周期的三角函数叠加作为伺服电动机加减速构造函数, 通过增加低速段加速度和减小高速段加速度来降低系统对伺服电动机功率的要求, 同时又保持加减速时间不变以满足压力机的冲压生产节拍。

收稿日期: 2012-10-30 修回日期: 2012-11-30

*“十一五”国家科技重大支撑计划资助项目(2010ZX04004-112)

作者简介: 宋清玉, 博士生, 一重集团大连设计研究院有限公司研究员, 主要从事重型压力机设计与理论研究, E-mail: song.qy@cfhi.com

1 加减速构造函数

为避免加减速过程对伺服压力机机械本体的冲击,伺服电动机加减速曲线须满足^[11]:速度变化平稳,加速度连续和加速度在变速起始和终止时满足边界条件,即在起始和终止时加速度为零,且起始和终止速度必须与要求的速度一致。根据伺服电动机额定转速以下恒转矩和额定转速以上恒功率运行的特点^[12],采用2个不同周期的三角函数叠加作为伺服电动机加减速构造函数,如图1所示。当伺服电动机从低转速过渡到高转速时,将加速区间分成2个阶段,在第1阶段采用周期为 $T = t_a$ (t_a 为加速阶段总运行时间)的三角函数构造伺服电动机加速度曲线,加速时间段为 $t \in [0, 0.25t_a]$;在第2阶段采用周期为 $T = 3t_a$ 三角函数构造加速度曲线,加速时间段为 $t \in (0.25t_a, t_a]$ 。当伺服电动机从高转速过渡到低转速时,将减速区间同样分成2个阶段,在第1阶段采用周期为 $T = 3t_d$ (t_d 为减速阶段总运行时间)的三角函数构造减速度曲线,减速时间段为 $t \in [0, 0.75t_d]$;在第2阶段采用周期为 $T = t_d$ 三角函数构造减速度曲线,减速时间段为 $t \in (0.75t_d, t_d]$ 。

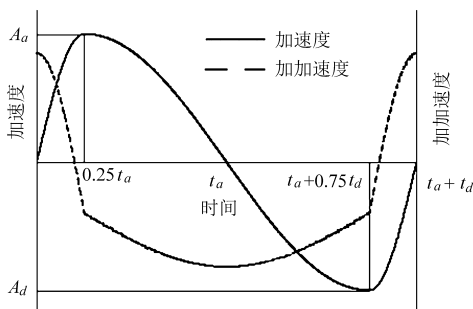


图1 伺服电动机加速度和加加速度曲线

Fig.1 Servo motor acceleration and jerk curves

根据上述加减速曲线构造基本要求,建立伺服电动机加速阶段的加速度构造函数为

$$a_a(t) = \begin{cases} A_a \sin\left(\frac{2t}{t_a}\pi\right) & (t \in [0, 0.25t_a]) \\ A_a \sin\left(\left(\frac{2t}{3t_a} + \frac{1}{3}\right)\pi\right) & (t \in (0.25t_a, t_a]) \end{cases} \quad (1)$$

式中 A_a ——加速阶段系统最大加速度
 t ——时间

根据式(1),当 $t=0$ 时, $a_{a1}(0)=0$;当 $t=0.25t_a$ 时, $a_{a1}(0.25t_a)=a_{a2}(0.25t_a)=A_a$;当 $t=t_a$ 时, $a_{a2}(t_a)=0$,表明该加速度构造函数能够满足加速度连续以及在起始和终止时加速度为零的边界条件。

对式(1)求导,得加速阶段加加速度函数为

$$J_a(t) = \begin{cases} \frac{2\pi}{t_a} A_a \cos\left(\frac{2t}{t_a}\pi\right) & (t \in [0, 0.25t_a]) \\ \frac{2\pi}{3t_a} A_a \cos\left(\left(\frac{2t}{3t_a} + \frac{1}{3}\right)\pi\right) & (t \in (0.25t_a, t_a]) \end{cases} \quad (2)$$

根据式(2),当 $t=0.25t_a$ 时, $J_{a1}(0.25t_a)=J_{a2}(0.25t_a)=0$,表明该加速度构造函数能够满足加加速度变化连续的边界条件。

同理,建立伺服电动机减速阶段的加速度构造函数为

$$a_d(t) = \begin{cases} -A_d \sin\left(\frac{2t}{3t_d}\pi\right) & (t \in [0, 0.75t_d]) \\ A_d \sin\left(\frac{2t}{t_d}\pi\right) & (t \in (0.75t_d, t_d]) \end{cases} \quad (3)$$

式中 A_d ——减速阶段系统最大加速度

对式(3)求导,得减速阶段加加速度函数为

$$J_d(t) = \begin{cases} -\frac{2\pi}{3t_d} A_d \cos\left(\frac{2t}{3t_d}\pi\right) & (t \in [0, 0.75t_d]) \\ \frac{2\pi}{t_d} A_d \cos\left(\frac{2t}{t_d}\pi\right) & (t \in (0.75t_d, t_d]) \end{cases} \quad (4)$$

2 加减速控制算法

假定一个程序段满足3个运行阶段:加速段、匀速段和减速段,如图2所示。伺服电动机首先从初始转速 N_1 加速到最大转速 N_{max} ,然后以最大转速 N_{max} 运行一段距离,当离终点一定距离时,进入减速段,减速至转速 N_2 时,到达程序段终点。

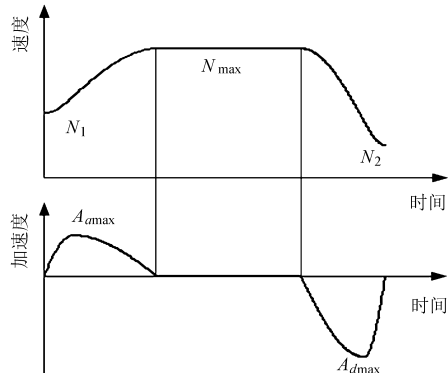


图2 伺服电动机速度和加速度曲线

Fig.2 Servo motor speed and acceleration curves

2.1 加速段计算

设 $A_a = A_{amax}$,对式(1)积分,得伺服电动机速度方程为

$$N_a(t) = \begin{cases} -\frac{A_{amax}t_a}{2\pi}\cos\left(\frac{2t}{t_a}\pi\right) + C_1 & (t \in [0, 0.25t_a]) \\ -\frac{3A_{amax}t_a}{2\pi}\cos\left(\left(\frac{2t}{3t_a} + \frac{1}{3}\right)\pi\right) + C_2 & (t \in (0.25t_a, t_a]) \end{cases} \quad (5)$$

式中 A_{amax} ——系统最大加速度

C_1, C_2 ——常数

根据 $N_{a1}(0) = N_1, N_{a1}(0.25t_a) = N_{a2}(0.25t_a)$

和 $N_{a2}(t_a) = N_{max}$ 边界条件, 可得

$$\begin{cases} C_1 = N_1 + \frac{A_{amax}t_a}{2\pi} \\ C_2 = N_{max} - \frac{3A_{amax}t_a}{2\pi} \\ A_{amax} = \frac{(N_{max} - N_1)\pi}{2t_a} \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)可得速度函数为

$$N_a(t) = \begin{cases} \frac{1}{4}(N_{max} + 3N_1) - \frac{1}{4}(N_{max} - N_1)\cos\left(\frac{2t}{t_a}\pi\right) & (t \in [0, 0.25t_a]) \\ \frac{1}{4}(N_{max} + 3N_1) - \frac{3}{4}(N_{max} - N_1)\cos\left(\left(\frac{2t}{3t_a} + \frac{1}{3}\right)\pi\right) & (t \in (0.25t_a, t_a]) \end{cases} \quad (7)$$

根据位移连续的边界条件, 即 $S_{a1}(0.25t_a) = S_{a2}(0.25t_a)$, 对式(7)积分可得位移函数为

$$S_a(t) = \begin{cases} \frac{3}{2}(N_{max} + 3N_1)t - \frac{3t_a}{4\pi}(N_{max} - N_1)\sin\left(\frac{2t}{t_a}\pi\right) & (t \in [0, 0.25t_a]) \\ \frac{3}{2}(N_{max} + 3N_1)t - \frac{27t_a}{4\pi}(N_{max} - N_1)\sin\left(\left(\frac{2t}{3t_a} + \frac{1}{3}\right)\pi\right) + \frac{6t_a}{\pi}(N_{max} - N_1) & (t \in (0.25t_a, t_a]) \end{cases} \quad (8)$$

将 $t = t_a$ 代入式(8), 可得加速阶段伺服电动机总位移为

$$S_a = \frac{3\pi(N_{max} + 3N_1)(N_{max} - N_1) + 12(N_{max} - N_1)^2}{4A_{amax}} \quad (9)$$

2.2 减速段计算

当伺服电动机从转速 N_{max} 减速至转速 N_2 时, 采用上述推导过程, 可得减速阶段伺服电动机的速度和位移函数, 分别为

$$N_d(t) =$$

$$\begin{cases} \frac{1}{4}(N_{max} + 3N_2) + \frac{3}{4}(N_{max} - N_2)\cos\left(\frac{2t}{t_d}\pi\right) & (t \in [0, 0.75t_d]) \\ \frac{1}{4}(N_{max} + 3N_2) - \frac{1}{4}(N_{max} - N_2)\cos\left(\frac{2t}{t_d}\pi\right) & (t \in (0.75t_d, t_d]) \end{cases} \quad (10)$$

$$S_d(t) =$$

$$\begin{cases} \frac{3}{2}(N_{max} + 3N_2)t + \frac{27t_d}{4\pi}(N_{max} - N_2)\sin\left(\frac{2t}{3t_d}\pi\right) & (t \in [0, 0.75t_d]) \\ \frac{3}{2}(N_{max} + 3N_2)t - \frac{3t_d}{4\pi}(N_{max} - N_2)\sin\left(\frac{2t}{t_d}\pi\right) + \frac{6t_d}{\pi}(N_{max} - N_2) & (t \in (0.75t_d, t_d]) \end{cases} \quad (11)$$

将 $t = t_d$ 代入式(11), 可得减速阶段伺服电动机总位移为

$$S_d = \frac{3\pi(N_{max} + 3N_2)(N_{max} - N_2) + 12(N_{max} - N_2)^2}{4A_{dmax}} \quad (12)$$

2.3 匀速段计算

定义程序段总长度为 S_0 , 若 $S_0 > S_a + S_d$, 则运行分3个阶段: 加速段、匀速段和减速段, 匀速段运行时间为

$$t_c = \frac{S_0 - S_a - S_d}{6N_{max}} \quad (13)$$

总运行时间为

$$t_0 = t_a + t_c + t_d \quad (14)$$

若 $S_0 \leq S_a + S_d$, 匀速段消失, $t_c = 0$ 。

2.4 运行方式选择

当 $S_0 \leq S_a + S_d$ 时, 运行过程可通过2种方式完成。方式1: 伺服电动机从转速 N_1 加速至某个转速 N_m , 然后减速至转速 N_2 , 且刚好到达程序段终点, 这种运行方式时间最短。方式2: 若 $N_1 > N_2$, 伺服电动机先以转速 N_1 匀速运行, 然后减速至转速 N_2 , 到达程序段终点; 若 $N_1 < N_2$, 伺服电动机从转速 N_1 加速至转速 N_2 , 然后以 N_2 匀速运行至程序段终点。

2.4.1 方式1

(1) 从转速 N_1 加速至 N_m , 用转速 N_m 代替 N_{max} , 则加速度、速度和位移分别按式(1)、(7)和(8)计算。加速阶段位移为

$$S_a = \frac{3\pi(N_m + 3N_1)(N_m - N_1) + 12(N_m - N_1)^2}{4A_{amax}} \quad (15)$$

(2) 从转速 N_m 减速至转速 N_2 , 用转速 N_m 代替 N_{max} , 则加速度、速度和位移分别按式(3)、(10)和(11)计算。减速阶段位移为

$$S_d = \frac{3\pi(N_m + 3N_2)(N_m - N_2) + 12(N_m - N_2)^2}{4A_{dmax}} \quad (16)$$

联立方程 $S_0 = S_a + S_d$, 式(15)和式(16), 可建立 N_m 的方程为

$$C_3 N_m^2 + C_4 N_m + C_5 = 0 \quad (17)$$

其中 $C_3 = (1 + 0.25\pi)(A_{amax} + A_{dmax})$

$$C_4 = (0.5\pi - 2)(A_{amax}N_2 + A_{dmax}N_1)$$

$$C_5 = (1 - 0.75\pi)(A_{amax}N_2^2 + A_{dmax}N_1^2) - S_0 A_{amax} A_{dmax} / 3$$

只有保证方程(17)有解, 且同时保证 $N_m > N_1$ 和 $N_m > N_2$ 时, 系统才能按方式1运行, 否则只能运行1个阶段。

2.4.2 方式2

当 $N_1 > N_2$ 时

(1) 从转速 N_1 减速至 N_2 , 用 N_1 代替 N_{max} , 则加速度、速度和位移分别按式(3)、(10)和(11)计算。减速阶段位移为

$$S_d = \frac{3\pi(N_1 + 3N_2)(N_1 - N_2) + 12(N_1 - N_2)^2}{4A_{dmax}} \quad (18)$$

(2) 若 $S_0 \leq S_d$, 无匀速运行阶段; 若 $S_0 > S_d$, 匀速运行时间为

$$t_c = \frac{S_0 - S_d}{6N_1} \quad (19)$$

当 $N_1 < N_2$ 时

(1) 从转速 N_1 加速至 N_2 , 用 N_2 代替 N_{max} , 则加速度、速度和位移分别按式(1)、(7)和(8)计算。加速阶段位移为

$$S_a = \frac{3\pi(N_2 + 3N_1)(N_2 - N_1) + 12(N_2 - N_1)^2}{4A_{amax}} \quad (20)$$

(2) 若 $S_0 \leq S_a$, 无匀速运行阶段; 若 $S_0 > S_a$, 匀速运行时间为

$$t_c = \frac{S_0 - S_a}{6N_2} \quad (21)$$

为了提高伺服压力机的冲压生产节拍, 应尽量减少压力机非工作区间段的运行时间, 即以较少的时间完成加减速过程, 因此采用方式1进行伺服压力机的加工工艺曲线规划设计。

3 性能比较与实验验证

3.1 与三角函数加减速算法性能比较

假定系统最大加速度、初始转速和终止转速等运行工况相同, 采用本文提出的控制算法和文献[10]中的三角函数控制算法分别进行加减速曲线规划, 计算结果表明, 2种算法所需的运行时间和最大转

矩相同, 但采用三角函数控制算法在高转速阶段明显要比本文提出的算法所需的电动机转矩大, 即伺服电动机2的转矩要比伺服电动机1大, 如图3所示。采用本文提出的加减速控制算法, 通过增加低速段加速度和减少高速段加速度, 所需的电动机转矩更能与伺服电动机特性曲线相匹配, 能够有效降低系统对伺服电动机功率的要求。

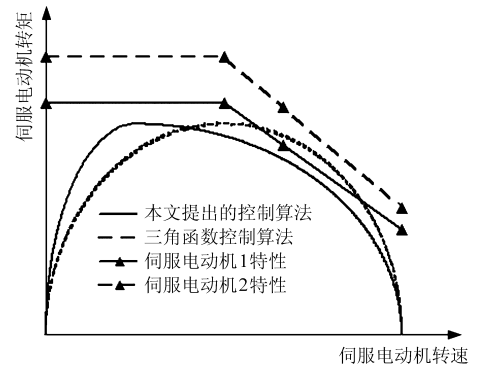


图3 2种加减速控制算法所需电动机转矩对比

Fig. 3 Comparison of required torque from servo motor calculated by two acceleration and deceleration control algorithms

3.2 实验验证

以某款车型的侧围板零件拉深成形为例, 采用本文提出的加减速控制算法进行拉深工艺曲线规划设计, 并在25000 kN 伺服压力机上进行验证。侧围板成形高度约为180 mm, 要求接触拉深速度低于250 mm/s, 滑块最大速度限制在2000 mm/s以内。

在满足机械手传输空间和时间、拉深速度、拔模速度、电动机转矩和发热等约束下, 采用优化算法进行优化设计, 获得该零件成形的最大生产节拍为13次/min, 优化计算出的电动机转速和曲柄加速度曲线如图4所示, 曲柄位移和滑块速度如图5所示。从图4中可以看出, 受滑块最大速度约束条件的限制, 电动机按方式1运行, 即先加速到某个最大速度值然后再减速到某个转速值以保证滑块速度满足约束条件。采用该加减速曲线在25000 kN 伺服压力机上成形侧围板, 压力机运行平稳, 接触冲击噪声较

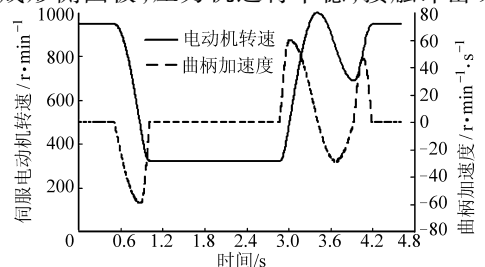


Fig. 4 用于侧围板成形的伺服电动机转速和曲柄加速度曲线

Fig. 4 Servo motor speed and crank acceleration curves of forming bodyside part

小,侧围板成形质量较高。

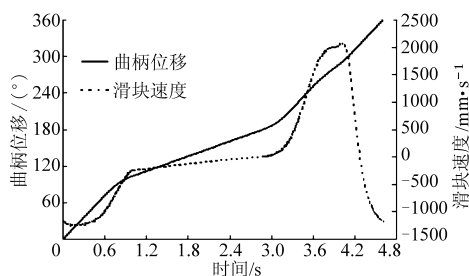


图5 用于侧围板成形的曲柄位移和滑块速度曲线

Fig.5 Crank displacement and slide velocity curves of forming bodyside part

4 结束语

提出了一种伺服电动机柔性加减速控制算法,采用2个不同周期的三角函数叠加作为伺服压力机加减速构造函数,既保留了三角函数加减速模式中速度、加速度、加加速度和位移均连续的特点,同时又降低了系统对伺服电动机功率的要求。该加减速控制算法已成功应用于25 000 kN 伺服压力机加工工艺曲线规划设计,伺服压力机运行平稳,零件成形质量有明显改善。

参 考 文 献

- 1 李建. 伺服压力机发展及其应用[J]. 一重技术, 2010(5): 1~5.
Li Jian. Servo press development and application[J]. CFHI Technology, 2010(5): 1~5. (in Chinese)
- 2 Ando H. Application of servo system in recent press machines[J]. Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, 2004, 45(526): 877~882.
- 3 Osakada K, Mori K, Altan T, et al. Mechanical servo press technology for metal forming[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2011, 60(2): 651~672.
- 4 李智国, 李萍萍, 刘继展, 等. 不同加减速控制算法的能耗分析与比较[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8): 193~197.
Li Zhiguo, Li Pingping, Liu Jizhan, et al. Research on acc/dec algorithms based on energy optimization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 193~197. (in Chinese)
- 5 郝齐, 关立文, 王立平. 重载混联机床智能加减速控制算法对驱动力的影响[J]. 清华大学学报, 2009, 49(11): 1770~1773.
Hao Qi, Guan Liwen, Wang Liping. Intelligent acceleration/deceleration control algorithm for drive force for a heavy duty hybrid machine tool[J]. Journal of Tsinghua University, 2009, 49(11): 1770~1773. (in Chinese)
- 6 张碧陶, 高伟强, 沈列, 等. S曲线加减速控制新算法的研究[J]. 机床与液压, 2009, 37(10): 27~29.
Zhang Bitao, Gao Weiqiang, Shen Lie, et al. The study of new S-curve acceleration/deceleration algorithm[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2009, 37(10): 27~29. (in Chinese)
- 7 黄兆斌, 黄云龙, 余世明. 几种步进电机加减速方法的对比研究及其应用[J]. 机电工程, 2011, 28(8): 951~953.
Huang Zhaobin, Huang Yunlong, Yu Shiming. Comparative study between several acceleration and deceleration methods on stepper motor and the application[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2011, 28(8): 951~953. (in Chinese)
- 8 杨超, 张冬泉. 基于S曲线的步进电动机加减速的控制[J]. 机电工程, 2011, 28(7): 813~817.
Yang Chao, Zhang Dongquan. Stepper motor's acceleration and speed control based on S-curve[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2011, 28(7): 813~817. (in Chinese)
- 9 孙建仁, 胡赤兵, 王保民. 一种Jerk连续的正弦函数平方曲线加减速算法研究[J]. 制造技术与机床, 2010(12): 158~161.
Sun Jianren, Hu Chibing, Wang Baomin. Research on a squared sine function shape curve acceleration and deceleration algorithm of continuous Jerk[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2010(12): 158~161. (in Chinese)
- 10 郭新贵, 李从心. 一种新型柔性加减速算法[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(2): 205~207.
Guo Xingui, Li Congxin. A new flexible acceleration and deceleration algorithm[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2003, 37(2): 205~207. (in Chinese)
- 11 谭启韬. 数控冲床x轴高速伺服运动加减速控制算法研究[J]. 机床与液压, 2011, 39(3): 121~122.
Tan Qitao. Research on acceleration/deceleration control methods for x-axis high speed servo motion of NC punching machine[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2011, 39(3): 121~122. (in Chinese)
- 12 王志强. 步进电机和交流伺服电机性能综合比较[J]. 天津职业院校联合学报, 2006, 8(5): 14~17.
Wang Zhiqiang. Comprehensive comparison between the stepper motor and the DC servo motor[J]. Journal of Tianjin Vocational Institutes, 2006, 8(5): 14~17. (in Chinese)