步进驱动系统大振荡机理与轨迹优化控制

张高阳 [1] 金 鑫 [1] 张之敬 [1]

摘 要 为了解决步进驱动系统运动控制中的振荡、丢步和失调等问题, 改善步进驱动系统的控制性能, 优化步进驱动系统的控制, 通过研究步进驱动系统的微步驱动控制过程, 建立了步进驱动系统的微步驱动数学模型, 提出了步进驱动系统的仿真建模方法, 通过仿真模型的数值模拟分析了大振荡、丢步及失调问题的产生原因并建立了大振荡及丢步的机理模型, 在此基础上进一步提出了基于稳态截止频率的速度轨迹优化控制方法. 最后, 通过一个实例进行了实验验证. 结果表明: 该建模方法能够准确地描述步进驱动系统的特性, 速度轨迹优化控制方法能够有效地消除摆臂系统的大振荡、丢步、失调等严重问题, 显著提高了摆臂系统运动平稳性及精密定位能力.

关键词 步进驱动系统, 大振荡, 建模仿真, 轨迹优化控制

引用格式 张高阳, 金鑫, 张之敬. 步进驱动系统大振荡机理与轨迹优化控制. 自动化学报, 2015, **41**(1): 84−93

DOI 10.16383/j.aas.2015.c140154

Large Oscillation Mechanism and Optimization Control of Stepping Systems

ZHANG Gao-Yang[1] JIN Xin[1] ZHANG Zhi-Jing[1]

Abstract In order to solve the stepper motion control drive system oscillation, lost step and imbalance issues to improve the control performance of stepper drive system and optimize the control of stepping drive system, an overall model of stepping drive system including speed trajectory generator, micro-step driver, hybrid stepper motor and load is established through the investigation on the structure of hybrid stepper motors, stepper-driven methods and modern stepping drive system drive control process. The influence of speed trajectory control on the stepper drive system performance and the mechanisms of oscillation, lost step, disorders are analyzed. A steady cutoff frequency identification method and a speed trajectory optimization control method based on stability-frequency characteristics are proposed. Subsequently, an example of stepper drive systems i.e. an arm system is tested. The results show that the speed trajectory optimization control method based on stability-frequency characteristics can very well eliminate the oscillating, lost step, imbalance and significantly improve running smoothness and precision positioning capability of the arm system. This optimal control method described in the arm system can be widely applied to the control of various stepper drive systems.

Key words Stepping drive system, large oscillation, modeling and simulation, velocity trajectory control

Citation Zhang Gao-Yang, Jin Xin, Zhang Zhi-Jing. Large oscillation mechanism and optimization control of stepping systems. *Acta Automatica Sinica*, 2015, **41**(1): 84−93

步进电机广泛应用在各种运动控制系统中[1−2], 在这些运动控制系统中, 要求步进电机进行平稳、快速定位. 而大振荡、堵转及丢步等步进电机的负面效应严重影响了步进电机的运行的平稳性及定位精度. 针对这些问题的研究目前主要集中于两个方面: 1) 步进电机微步电流控制方法[3−4]; 2) 步进电机速度轨迹控制方法[5−10]. 这些研究都没有明确地阐述负面效应的产生机理, 也没有提出防止负面效应产生的有效方法, 使得在实际应用中仍然经常出现大振荡、丢步、失调等严重问题. 造成这种现象的根本原因在于没有将步进电机、驱动器、控制器、负载组成的步进驱动系统做为一个整体进行分析, 以明确阐述速度轨迹控制对各种负面效应的影响关系. 如同木桶理论, 对步进驱动系统中某一部分的极致优化由于其他部分短板的存在导致整体系统的控制并不能取得最优的效果[11]. 因此, 分析步进电机、驱动器、控制器、负载组成的整体系统, 研究各部分的内在相互作用机理, 从整体的角度分析负面因素产生原因, 从整体优化的角度寻求一种速度轨迹控制方法来指导步进驱动系统的控制是提高步进驱动系统的定位精度及运行的平稳性的有效途径.

本文通过分析步进驱动系统整体控制过程, 提出了步进驱动系统的整体建模及仿真方法, 以该模型为基础分析了负面因素的产生机理并建立了其机理模型, 进一步提出了步进驱动系统的优化控制方法, 最后以一个实例验证了优化控制方法的效果.

1 步进驱动系统建模方法

步进驱动系统控制结构如图 1 所示, 它是包含

收稿日期 2014-03-14 录用日期 2014-06-30
Manuscript received March 14, 2014; accepted June 30, 2014
国家自然科学基金 (51127004), 国防基础科研 (A0920110013) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (51127004), and Defense Basic Research (A0920110013)
本文责任编委 侯增广
Recommended by Associate Editor HOU Zeng-Guang
1. 北京理工大学机械与车辆学院 北京 100081
1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081

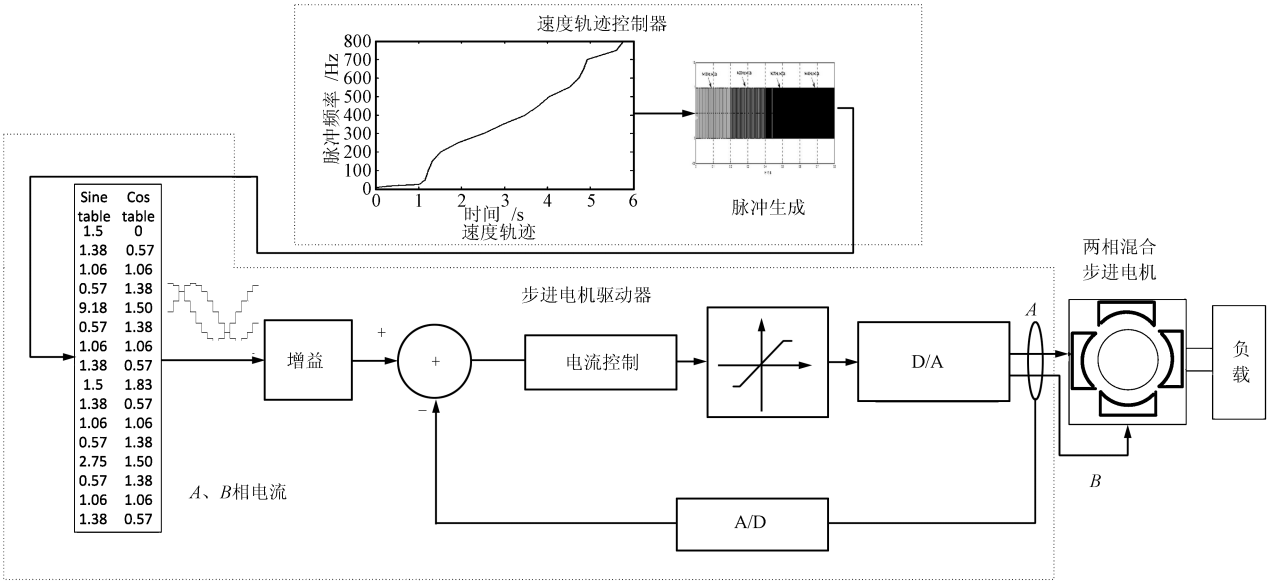


图 1　步进驱动系统控制结构

Fig. 1　Step motor system architecture

离散系统、连续系统、时序逻辑系统等子系统的复杂混合系统, 单一建模方法无法描述整个系统的动态行为及过程, 其建模过程应该是包含数学模型及行为逻辑描述的综合建模. 综合模型的建模过程按照系统的组成分为 3 部分: 1) 混合步进电机模型; 2) 电机驱动器建模; 3) 速度轨迹控制器的建模. 步进驱动系统仿真模型的效果取决于模型的准确度, 下面将分别对混合步进电机、步进电机驱动器、控制器进行分析, 建立其准确的行为描述模型.

1.1　两相混合步进电机模型

两相混合步进电机包含两相电流输入. 每一相电流缠绕在一对定子磁极上, 转子由两套子齿组成, 一般每套子齿包含 25 个齿, 且两个子齿错位 180° 放置, 当一相电流通电时, 转子转动一个齿的度数 1.8°. 简化的两相混合步进电机的描述方程如下[12].

$$\frac{\mathrm{d}i_A}{\mathrm{d}t} = \frac{[u_A - Ri_A + k_m\omega\sin(N_r\theta)]}{L} \tag{1}$$

$$\frac{\mathrm{d}i_B}{\mathrm{d}t} = \frac{[u_B - Ri_B - k_m\omega\cos(N_r\theta)]}{L} \tag{2}$$

$$\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = \frac{-k_m i_A\sin(N_r\theta) + k_m i_B\cos(N_r\theta) - B\omega - \tau}{J} \tag{3}$$

$$\frac{\mathrm{d}_\theta}{\mathrm{d}t} = \omega \tag{4}$$

上式中, 各参数意义如下: i_A 和 i_B, u_A 和 u_B 分别为 A、B 相电流和电压, L 和 R 分别为定子绕组的电感和电阻, K_m 为电机力矩常量, N_r 为转子齿数, J 为转子转动惯量, B 为粘滞摩擦系数, ω 为转子转速, θ 为转子位置, τ 为负载转矩. 为了简化分析, 这个模型忽略了相电磁耦合与转子位置 θ 导致的线圈电感 L 的轻微变化.

基于混合步进电机描述方程, 建立的混合步进电机的 Simulink 模型如图 2 所示, 输入为线圈电压 u_A、u_B, 转速 w 及转动角度 θ 为输出. 线圈电流、转动角度等初始条件为 0. 动态过程如下: 由输入 u_A、u_B 及转子位置 θ 产生线圈电流 i_A、i_B, 然后由线圈电流、转子位置及负载生成下一时刻的转子转速, 转子转速的积分即为输出角度 θ.

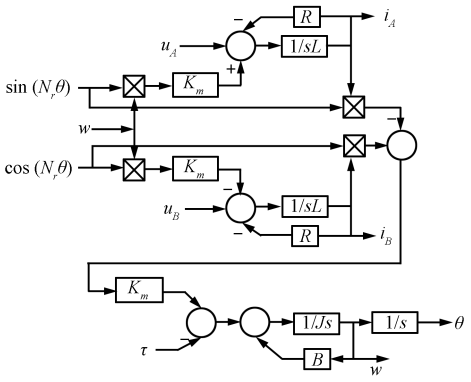


图 2　混合步进电机 Simulink 模型框图

Fig. 2　Diagram of hybrid stepper motor Simulink model

1.2　电机驱动器建模方法

步进电机驱动器可以说是 A、B 相绕组的电流控制器, 其作用是对绕组内电流大小及电流变化方向的控制. 当通电顺序为 $A \longrightarrow B$, 且 A 相电流由 1 到 0, B 相电流由 0 到 1 变化时, 电流每变化一次,

步进电机将转动 1 步. 当 A、B 相电流不是直接的 0、1 变化, 而是分为更细小的电流值逐渐增加或减少, 步进电机将进入微步运动. 微步大小取决于电流值细分的个数即细分数.

设电流细分数为 n, 将整步电流分为 n 份, 电流的每一次变化为整步电流的 $1/n$, 对应的微步进角度也变为整步的 $1/n$. 细分电流的产生可用下式计算.

$$i_A^k = A\cos(k\cdot\frac{\pi}{2n}) \tag{5}$$

$$i_B^k = A\sin(k\cdot\frac{\pi}{2n}) \tag{6}$$

式中, $k=0,1,\cdots,4n-1$. i_A^k、i_B^k 分别为 A、B 相绕组电流在一个周期内第 k 步细分电流值. 如果对电流进行 4 细分, 即 $k=0,1,\cdots,15$, 将 k 值进行循环输入, 可得定子线圈 A、B 绕组每周期细分电流的输出为 $I_A=\{i_A^0,i_A^1,\cdots,i_A^{15}\}$, $I_B=\{i_B^0,i_B^1,\cdots,i_B^{15}\}$. 理论上如果将细分数 n 增大, 步进电机可进行微步进角为无限小的微步运动.

步进电机驱动器电流控制过程如图 3 所示, 步进电机驱动器内部包括环形分配器、电流细分查找表及电流控制器. 当控制器输入一个脉冲时, 在输入脉冲上升沿, 环形分配器对输入脉冲进行计数, 并依次输出计数值, 当计数值达到细分数时, 计数值清零. 电流细分查找表根据输入的计数值查找相应的电流细分值, 并将细分电流值输出到电流控制器. 为加快细分电流给出速度, 细分数对应的细分电流序列并不是实时计算的, 而是根据式 (5) 和式 (6) 事先算出并存储在存储器中, 在控制器的脉冲输入的上升沿根据脉冲计数器的值查找对应的输出细分电流值, 驱动过程的频率由输入脉冲频率决定, 在输入脉冲的上升沿, 电流控制器控制步进电机线圈电流达到给定的细分电流值, 步进电机将按照细分电流值对应的微步距步进一步. 当驱动器输入某一频率 f 的脉冲时, 电流控制器给定细分电流值的速度也为频率 f, 这将驱动步进电机将按照频率 f 连续微步进.

1.3 速度轨迹控制器建模方法

速度轨迹控制器用于产生速度控制的轨迹曲线, 进行步进电机的转速控制, 从而控制步进驱动系统的运动速度. 控制器根据设定的轨迹曲线, 将其转换为对应频率的脉冲信号, 并控制各频率脉冲信号的输出时间, 从而对步进电机的转速进行精确的调整. 速度轨迹产生的实质是脉冲时间序列与脉冲频率序列的合成. 设给定一个速度轨迹曲线 $f=V(t)$, 一个脉冲时间序列如 $T=\{t_1,t_2,\cdots,t_n\}$, 脉冲频率序列 $f=\{f_1,f_2,\cdots,f_n\}$, 脉冲时间与脉冲频率的关系为 $f_k=V(t_k)$, $k=1,2,\cdots,n$, 则速度轨迹可用 $V=\{(t_1,f_1),(t_1,f_1),\cdots,(t_n,f_n)\}$ 表示.

速度轨迹产生逻辑的行为可用状态流描述, 状态流模型如图 4 所示, 圆表示状态, 箭头表示状态转移及转移条件. 脉冲时间间隔生成器每个状态代表一个时间间隔 t_s, $s=1,2,\cdots,n$, 每一个时间间隔对应输出一个脉冲频率值 f_s, $s=1,2,\cdots,n$, 在模拟开始时状态机进入初始化状态, 在初始化状态定义初始化输出脉冲频率 $f=0$, 最小计时单位即输入时钟周期 T, 初始化状态时间计时器 $t=0$, 在第一个时钟上升沿到来时, 初始化状态转移到 t_1 状态, 在 t_1 状态, 输出对应脉冲频率 f_1, 当计时器 $t>t_1$ 时, 状态由 t_1 转移到 t_2. 脉冲时间间隔生成器的状态依时间间隔序列依次转移, 输出时间间隔对应的频率到脉冲频率生成器, 脉冲频率生成器由输入频率 f 及时钟频率 F 由式 $F/(2f)$ 计算高低电平转移, 脉冲输出即为时间间隔序列与脉冲频率序列的合成速度轨迹.

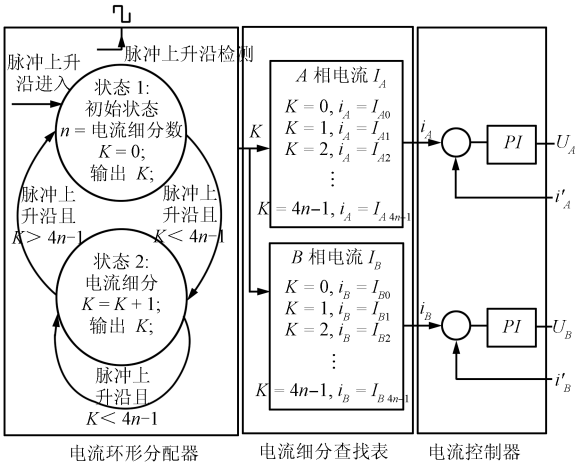


图 3 微步驱动器电流控制过程

Fig. 3 Behavioral description model of step motor drive

1.4 步进驱动系统仿真模型的建立

基于以上步进驱动系统建模方法, 通过状态流图 Stateflow 和 Simulink 建立的步进驱动系统仿真模型如图 5 所示. 该系统仿真模型包含了速度轨迹控制器、脉冲分频器、电流环形分配器、A 相 B 相查找表、混合步进电机及负载等分系统模型. 整个模型由轨迹生成器的系统时钟驱动, 混合步进电机的仿真频率应至少为 100 kHz[13], 因此, 驱动系统时钟基准也采用这个频率. 模型输入的速度轨迹为 $\{v_1,v_2,\cdots,v_{10}\}$, 模型输出包括驱动器电流、转子位置轨迹、位置误差、A 相 B 相线圈电流、电机输出转速与力矩等. 为简化系统分析, 在步进驱动系统的建模过程中未考虑细分后力矩脉动的影响.

2 步进驱动系统速度轨迹控制过程仿真

2.1 稳态、振荡与失调

为了更好地阐述步进驱动系统的动态过程, 本文提出如下概念, 且所指概念仅限于步进驱动系统运行过程的描述.

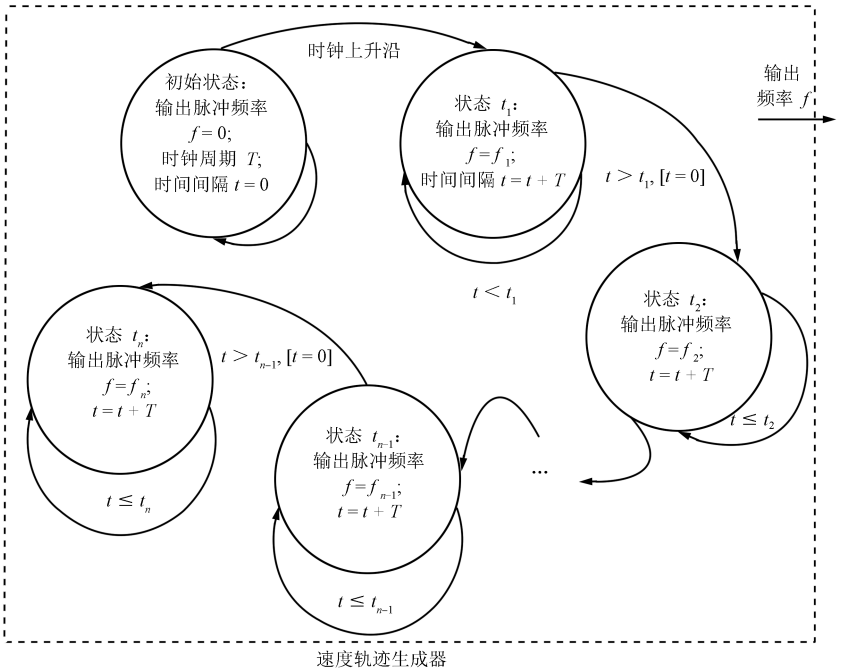


图 4　速度轨迹生成器状态流模型

Fig. 4　Speed trajectory generator state flow model

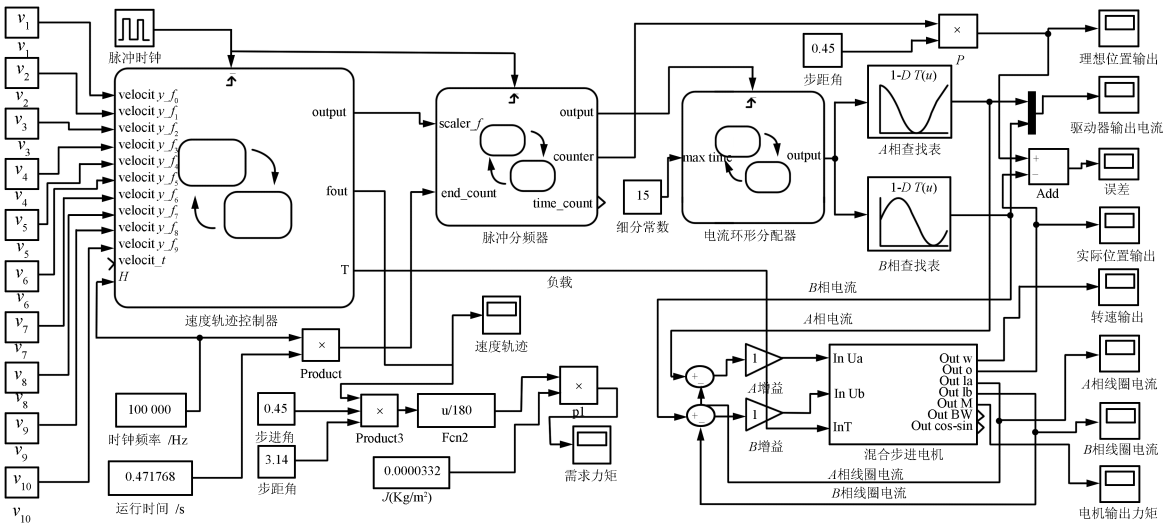


图 5　步进驱动系统仿真模型

Fig. 5　Stepper drive system simulation model

大振荡: 步进电机转子大于一个微步距的颤动, 此颤动远大于微步定位振荡.

稳态过程: 步进驱动系统无丢步、无大振荡运动过程.

振荡过程: 步进驱动系统进入大振荡、丢步运动过程, 但步进电机旋转方向仍能够保持.

失调过程: 步进驱动系统进入大振荡、丢步运动过程, 步进电机不能保持原来的旋转方向, 进入反转或堵转状态.

稳态截止频率: 步进驱动系统由稳态过程进入振荡过程时的频率.

振荡截止频率: 步进驱动系统由振荡过程进入失调过程时的频率.

为验证模型的准确度, 对步进驱动系统进行速度轨迹控制过程的仿真. 在图 5 所示模型中, 设定加速轨迹的脉冲频率序列为 100 Hz、200 Hz、270 Hz、

320 Hz、448 Hz、800 Hz, 脉冲时间间隔 0.2 s, 系统输入时钟 100 kHz, 驱动电流 4 细分, 由脉冲频率序列与脉冲时间间隔合成速度轨迹曲线如图 6 (a) 所示, 驱动器电流细分数为 4, 电流大小 1.5 A, 由式 (7) 和式 (8) 可得一个周期内的输出的 A、B 相细分电流值为

$$I_A = \{i_A^k | i_A^k = 1.5\cos(\frac{k\pi}{8}), k = 1, \cdots, 15\} \quad (7)$$

$$I_B = \{i_B^k | i_B^k = 1.5\sin(\frac{k\pi}{8}), k = 1, \cdots, 15\} \quad (8)$$

细分电流如图 6 (b) 所示, 相细分输出电流频率与控制器脉冲输入频率一致. 步进电机的转子位置轨迹如图 6 (c) 所示, 步进驱动频率在 100 Hz, 200 Hz, 270 Hz 时, 步进电机运行平稳, 无大振荡产生. 当步进驱动频率达到 448 Hz 时, 步进电机开始具有强烈大振荡, 随着驱动脉冲频率增大到 600 Hz, 大振荡越来越剧烈, 当驱动脉冲频率大于 800 Hz 时, 步进电机在大振荡的同时开始反向运动. 从图 6 (d) 可知, 在大振荡点, 步进电机开始丢步, 随着驱动频率的提高, 步进电机的丢步越来越严重, 导致了严重的定位误差.

从图 6 步进驱动系统加速轨迹仿真结果可以看到, 步进驱动系统随驱动脉冲频率的提高会经历三种过程状态, 分别为稳态过程、振荡过程、失调过程. 在稳态过程, 步进电机能够稳定运行, 无大振荡及丢步现象; 在振荡过程, 步进电机开始产生大振荡及丢步问题, 且随驱动频率的增加越来越严重, 当达到 800 Hz 频率时, 步进电机不能维持原转动状态进入失调过程.

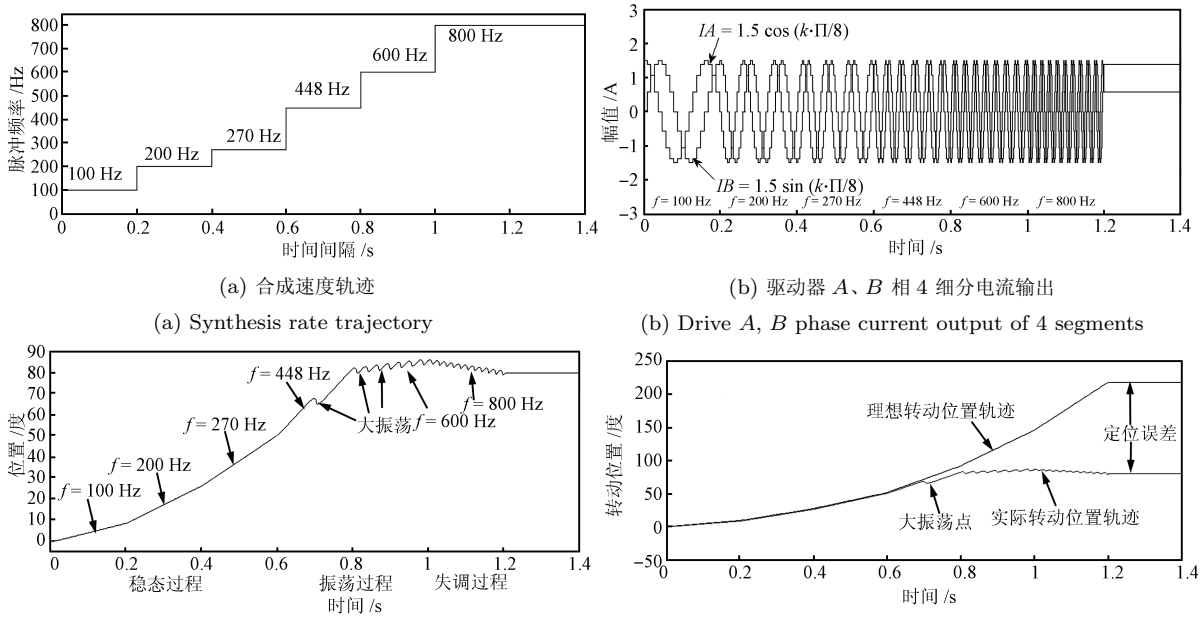
2.2 大振荡与丢步机理分析

步进电机能够带动负载以一定的速度运动是因为步进电机的输出转矩, 步进电机要保持稳态准确步进, 步进电机应提供足够的驱动转矩带动负载按给定速度运转. 那么可假设步进电机不能保持准确步进运动而产生大振荡的原因是力矩不足, 基于这一假设, 推导步进电机的大振荡机理可做如下分析.

步进电机的连续转动实际上并不是纯粹意义上的转子的连续转动, 而是由连续的单一微步进运动连接造成的视觉上的连续. 如果把时间放的足够慢来观察组成连续运动的微步运动, 每一个微步进都包含了启动与制动过程, 只是这一过程极为短暂, 肉眼难以分辨. 但是如果细分数减少, 步距角增大能够明显分辨步进电机明显的单步运动组成连续运动的过程. 那么对于由微步进运动组成的转子的转动, 其每一步的转速增量应在转速范围之内, 介于 0 到 w 之间. 因此步进电机转矩与转速的关系式可由下式表示

$$M = J\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} \geq M = J\lambda\frac{\theta_b}{t_s}, \quad 0 < \lambda \leq 1 \quad (9)$$

式中, ω 表示转子转速, M 表示步进电机按转速 ω 转动需要的转矩, J 为转子转动惯量, θ_b 是微步步距, t_s 是微步周期, λ 是一个微步内的加速比例系数.



(a) 合成速度轨迹

(a) Synthesis rate trajectory

(b) 驱动器 A、B 相 4 细分电流输出

(b) Drive A, B phase current output of 4 segments

(c) 步进电机角度位置轨迹

(c) Stepper motor rotor position trajectory

(d) 定位误差

(d) Positioning error

图 6 加速轨迹仿真结果

Fig. 6 Acceleration trajectory simulation results

由式 (3) 可得步进电机的输出转速与输出转矩为

$$\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=\frac{-k_m i_a\sin(N_r\theta)+k_m i_b\cos(N_r\theta)-B\omega-\tau}{J} \tag{10}$$

$$M'=J\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} \tag{11}$$

由式 (10) 和式 (11) 得步进电机输出转矩为

$$M'=-k_m i_a\sin(N_r\theta)+k_m i_b\cos(N_r\theta)-B\omega-\tau \tag{12}$$

由式 (9) 和式 (11) 可得步进电机产生大振荡的条件为 $M'<M$.

图 7 为步进电机运动过程位置轨迹与输出力矩的关系. 从图 7 可知, 步进电机随驱动频率的提高、转速的增大, 输出力矩不断减少, 当步进电机的输出转矩 M' 不足以提供维持转速 ω 所需转矩 M 时, 步进电机进入大振荡过程, 步进电机的大振荡是随着输出力矩的减小导致的. 图 7 所示结果也验证了步进电机大振荡的产生机理的假设.

步进电机随驱动频率的提高、转速的增大, 输出力矩 M' 不断减小, 而维持转速增加所需额定转矩 M 不断增加, 当驱动频率达到稳态截止频率时, 输出转矩 M' 将达不到额定转矩 M, 导致大振荡及丢步的产生. 而由式 (10) 知, 驱动力矩是由线圈电流产生的, 线圈电流 i_A、i_B 的变化导致了输出力矩的变化, 但是由于粘滞摩擦系数是极小的, $B\omega$ 项对 M' 的减小贡献较小, 力矩变化主要是由线圈电流减小引起.

由模型可得 A、B 相线圈电流随驱动频率的变化如图 8 所示. 由图可知, 线圈电流随驱动频率的增加幅值不断减小. 其原因在于反电动势的作用, 当转速增大时, 转子线圈的磁通量变化加快, 导致线圈中反电动势增大, 由于线圈绕组电流的幅值随驱动频率增大明显降低, 这一电流变化直接导致输出力矩的减小, 因此, 电流的幅值变化是导致步进驱动系统大振荡及丢步的根本原因.

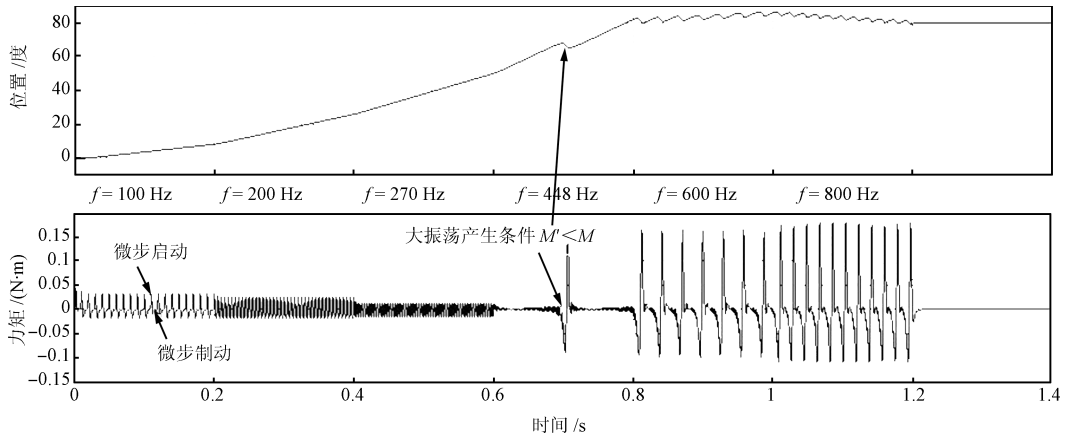


图 7　位置轨迹与输出力矩的关系

Fig. 7　The relationship of the output torque and track position

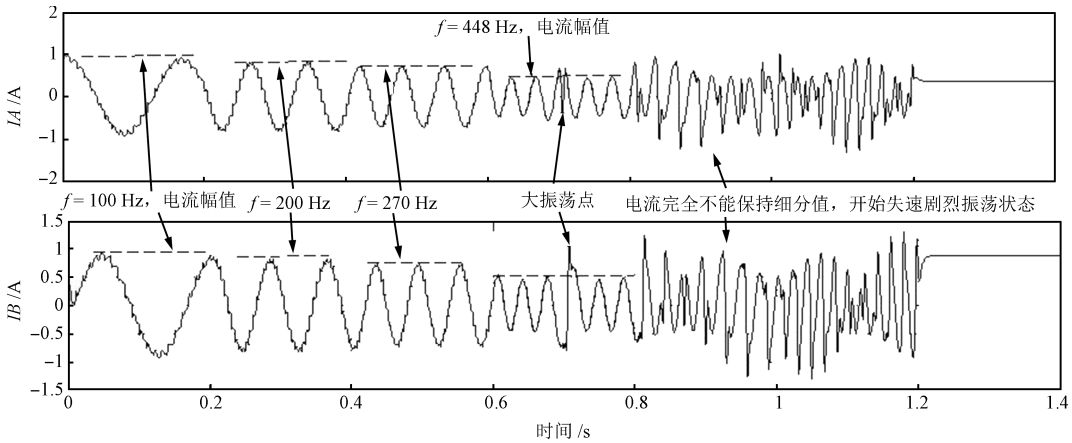


图 8　A、B 相线圈电流随频率的变化

Fig. 8　A, B phase coil current changes with frequency

2.3 步进驱动系统速度轨迹优化控制方法

大振荡、丢步现象是步进驱动系统固有的特征, 随驱动频率、电机转速的增加必然会引起定子线圈绕组电流幅值的减小, 从而导致步进电机输出力矩减小, 当输出力矩不足以提供维持转速所需转矩时必然导致大振荡及丢步的产生. 因此在步进驱动系统的速度轨迹不能是任意曲线, 而应考虑步进驱动系统能够达到的无振荡最高转速, 使驱动频率不超过稳态截止频率. 当步进驱动系统确定时, 稳态截止频率主要取决于负载的大小, 负载越大, 稳态截止频率越小. 步进驱动系统在某一负载下的最高驱动频率必须不能超过稳态截止频率. 因此负载与稳态截止频率的对应关系对于步进驱动系统的控制具有重要的指导作用, 如果能够确定稳态截止频率与负载的关系, 就能够根据这一关系调整驱动频率轨迹, 避免大振荡及丢步的产生. 步进驱动系统的驱动频率轨迹与带负载电机转矩及角度位置的关系可以进行如下的推导. 将控制器输出脉冲频率 $f=\{f_1,f_2,\cdots,f_n\}$ 代入式 (5) 和式 (6) 得频率与细分电流值得关系如下式:

$$i_A = A\cos(f\cdot t\cdot\frac{\pi}{2n}) \tag{13}$$

$$i_B = A\sin(f\cdot t\cdot\frac{\pi}{2n}) \tag{14}$$

驱动器中电流控制策略可采用比例、比例积分或其他非线性控制策略, 具体采用何种控制策略进行建模应根据具体对象实际情况决定. 例如, 在电流控制策略为比例控制情况下, 可得如下关系:

$$u_A = k(i_A - i_a) \tag{15}$$

$$u_B = k(i_B - i_b) \tag{16}$$

式中, k 为比例控制系数, i_a、i_b 为转子线圈电流. 因此, 包含驱动频率的步进驱动系统模型如下:

$$\frac{\mathrm{d}i_a}{\mathrm{d}t} = \frac{kA\cos(f\cdot t\cdot\frac{\pi}{2n}) - (R+k)i_a + k_m\omega\sin(N_r\theta)}{L} \tag{17}$$

$$\frac{\mathrm{d}i_b}{\mathrm{d}t} = \frac{kA\sin(f\cdot t\cdot\frac{\pi}{2n}) - (R+k)i_b - k_m\omega\cos(N_r\theta)}{L} \tag{18}$$

$$\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = \frac{[-k_m i_a\sin(N_r\theta) + k_m i_b\cos(N_r\theta) - B\omega - \tau]}{J} \tag{19}$$

$$\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} = \omega \tag{20}$$

步进驱动系统模型表示了电机驱动频率与输出位置角度的关系. 设 θ' 代表步进电机理想输出位置, θ_b 代表一个步距角, 根据大振荡的产生条件, 当 $M'<M$ 时, 必然产生丢步导致 $\theta'-\theta>\theta_b$, 根据这一条件, 由步进驱动系统模型进行数值模拟可求得负载 τ 与稳态截止频率 f 的关系.

当驱动频率在稳态截止频率内时, 除系统共振频率外, 步进驱动系统能够无振荡、无丢步稳定运行, 当驱动频率超过稳态截止频率时, 步进驱动系统进入大振荡运动状态, 驱动频率越高, 振荡越剧烈. 用稳态截止频率曲线指导步进驱动系统速度轨迹控制方法如下: 无论采用何种加减速速度轨迹控制曲线, 要使步进驱动系统无振荡与丢步问题, 必须保证最高驱动频率不能超过稳态截止频率, 且加减速控制方法、速度轨迹曲线形状对步进驱动系统的振荡与丢步问题并无必然的因果联系.

3 步进驱动摆臂系统的轨迹优化控制

图 9 为步进驱动摆臂系统, 用于在微装配中待装配件的对位及装配, 通过混合步进电机系统辨识[14−15], 混合步进电机参数如表 1 所示. 控制器为以 TMS320F2812 为核心的 DSP 数字控制器, 主频 150 MHz.

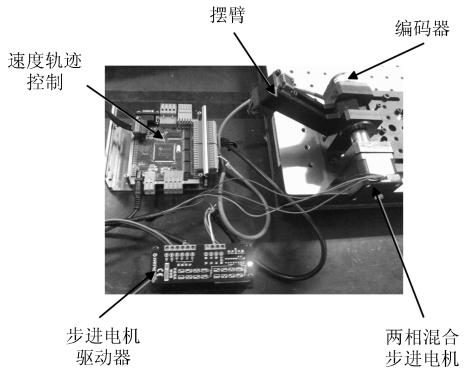


图 9 步进驱动摆臂系统

Fig. 9 Stepper drive arm system

表 1 混合步进电机参数辨识

Table 1 Hybrid stepper motor parameter identification

电机参数	辨识结果
绕组电感 L	0.00131 H
绕组电阻 R	0.58 Ω
电机力矩常量 Km	0.23 (N · m)/A
转子齿数 Nr	50
转子转动惯量 J	0.0000332 kg · m^2
粘滞摩擦系数 B	0.0008 (N · m)/(rad · s)

步进驱动系统的负载摆臂结构如图 10 所示,

摆臂质量为 0.218474 kg, 质心距中心轴偏移量为 0.63 m, 摆臂水平状态下负载转矩为 0.137 N·m. 分析摆臂转动 90° 的过程, 这一过程中摆臂系统对步进电机来说是变负载的.

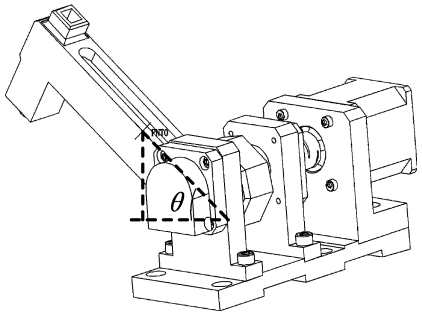


图 10　摆臂负载的结构

Fig. 10　Arm load structure

设负载为 τ, 则

$$\tau = \tau_0 \cos(\theta),\ 0 \le \theta \le 90^\circ \tag{21}$$

由摆臂系统的负载变化得到的稳态截止频率曲线如图 11 所示. 由稳态截止频率曲线知, 对应于负载 τ 的变化, 稳态截止频率以稳态截止频率曲线关系变化, 即稳态截止频率也是变化的, 负载与稳态截止频率的关系如下: 在转动角度 θ 为 0° 时, 负载转矩最大, 稳态截止频率最低; 随着 θ 由 0° 逐渐增大到 90°, 负载不断减小, 稳态截止频率不断增大.

根据这一变化关系, 简单的轨迹优化方法如下: 将摆臂摆动到 90° 的过程分为间隔为 9° 的十个连续运动过程, 每个过程对应的步进电机起始转动角度依次为 $\{0, 9, 18, 27, 36, 45, 54, 63, 72, 81\}$, 那么每个过程起始时, 摆臂对电机轴的负载由式 (21) 可得 $T = \{\tau_1, \tau_2, \cdots, \tau_{10}\}$, 由负载与稳态截止频率求得每个负载对应的稳态截止频率为 $f = \{f_1, f_2, \cdots, f_{10}\}$, 当电流为 4 细分, 步距角为 0.45°, 每转动 9° 需要脉冲个数为 20, 稳态截止频率序列对应的时间间隔按下式计算:

$$t_k = \frac{20}{f_k},\ k = 1, 2, \cdots, 10 \tag{22}$$

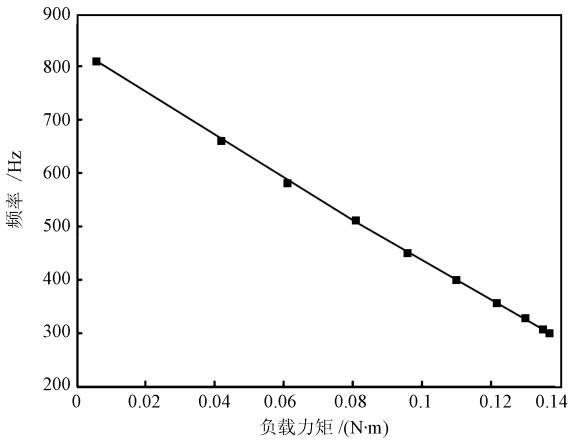


图 11　稳态截止频率曲线

Fig. 11　Steady cutoff frequency curve

$t = \{t_1, t_2, \cdots, t_{10}\}$, 摆臂转角在 0° 到 90° 过程中的间隔为 9° 的 10 个角度对应得负载力矩、稳态截止频率、时间间隔关系如表 2 所示, 其中的速度频率序列即为优化的速度轨迹, 速度轨迹曲线如图 12 所示.

如果不进行速度轨迹的优化, 直接给定一驱动频率 $f_0 = 507$ Hz, 由编码器测得运动轨迹如图 13 所示, 可以看到步进电机经历了失调及大振荡过程, 丢步严重. 显然频率 f_0 超过了摆臂负载的稳态截止频率. 当 36° 时, 将频率 397 Hz 改为 430 Hz 的位置轨迹如图 14 所示, 在频率 430 Hz 过程产生了大振荡, 因为在 36°, 负载为 0.110 N·m 的稳定截止频率为 397 Hz. 由于 430 Hz > 397 Hz, 不可避免地导致了大振荡的产生. 使用图 11 的优化的速度轨迹, 实际位置轨迹如图 15, 由图可知步进电机无丢步、无

表 2　速度轨迹优化计算结果

Table 2　Speed trajectory optimization results

	开始位置角度 (°)	负载转矩 (N·m)	稳态截止频率 (Hz)	时间间隔 (s)	速度频率 (Hz)
Process 1	0	0.137	298	0.067114	298
Process 2	9	0.0135	303	0.066006	303
Process 3	18	0.130	322	0.062111	322
Process 4	27	0.122	353	0.056657	353
Process 5	36	0.110	397	0.050377	397
Process 6	45	0.096	450	0.044444	450
Process 7	54	0.081	507	0.039447	507
Process 8	63	0.062	581	0.034423	581
Process 9	72	0.042	660	0.030303	660
Process 10	81	0.006	808	0.024752	808

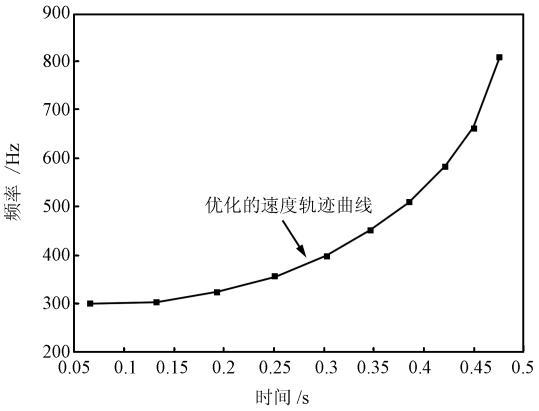


图 12 优化的速度轨迹曲线

Fig. 12 Optimized speed trajectory curve

大振荡, 以优化的速度轨迹控制产生了接近理想的运动位置轨迹, 保证了摆臂的定位精度.

4 结论

步进驱动系统的运动性能依运行速度变化可分为三个过程: 当速度小于稳定截止频率时稳定运行; 当速度大于稳定截止频率进入振荡运动过程; 当速度大于失调频率时进入失调过程.

步进驱动系统负载与稳定截止频率成负相关关系, 负载越大, 稳定截止频率越低; 在截止频率范围内, 步进系统的最高运行速度小于截止频率时, 速度轨迹控制及速度轨迹曲线对变负载步进驱动系统的负面效应如大振荡、丢步、定位精度等没有显著影响; 当速度轨迹或最高运行速度高于截止频率时, 加

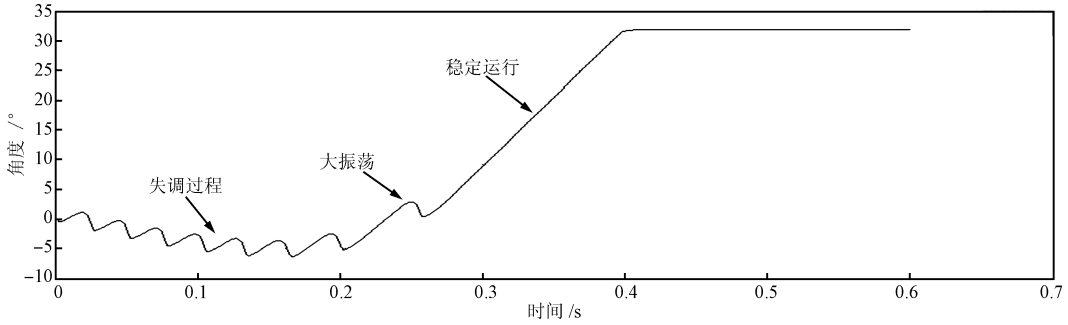


图 13 速度 450 Hz 位置轨迹

Fig. 13 Position trajectory of track speed 450 Hz

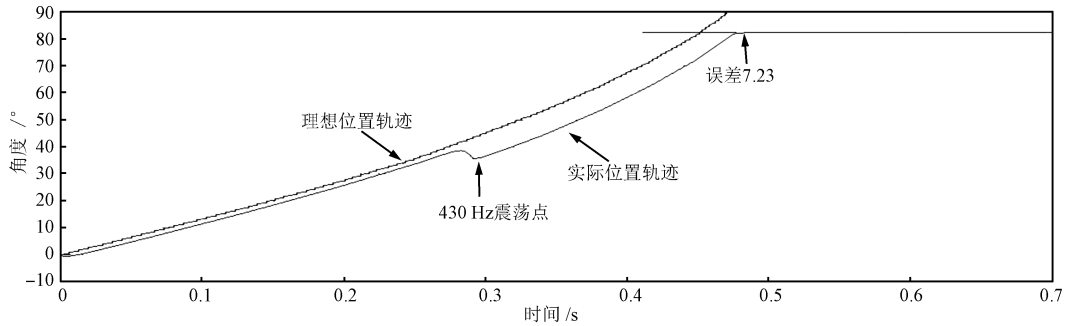


图 14 在 36°、速度为 430 Hz 条件下的位置轨迹曲线

Fig. 14 Position trajectory curves at 36°, 430 Hz conditions

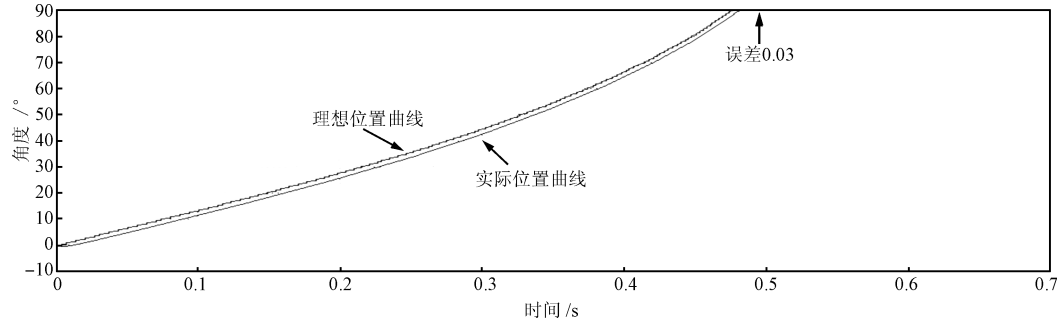


图 15 速度轨迹优化的位置轨迹曲线

Fig. 15 Speed trajectory optimized position trajectory curves

减速运动会显著改善定位振荡, 但对于速度高于稳定截止频率时产生的振荡无改善效果; 对于不同的负载, 步进驱动系统都有一个稳定截止频率, 在稳定截止频率内, 步进电机可以直接以任意速度稳定运行, 步进振荡、定位精度主要取决于微步步进角, 与运动速度无关. 当高于稳定截止速度运行时, 步进驱动系统将变得极不稳定, 振荡增大, 丢步严重, 当达到堵转频率时, 步进驱动系统将反转或无法启动.

运行过程应尽量采用大细分、高频率驱动, 这会显著改善运行过程的振荡, 细分越大, 振荡越小; 而不应采用小细分、低频率, 这种情况下, 由小细分、大步进角带来的振荡会破坏步进电机运行的平稳性.

References

1 Kenjo T, Sugawara A. *Stepping Motors and Their Microprocessor Controls*. Oxford: Clarendon Press, 1994. 45−70

2 Shen Fei, Xu De, Tang Yong-Jian, Wu Wen-Rong, Yu Da-Hai. Review of measuring and control technology of microforce in micromanipulation and microassembly. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(5): 785−797
(沈飞, 徐德, 唐永建, 吴文荣, 余大海. 微操作/微装配中微力觉的测量与控制技术研究现状综述. 自动化学报, 2014, **40**(5): 785−797)

3 Acarnley P. *Stepping Motors: A Guide to Theory and Practice* (*4th Edition*). Stevenage, UK: Institute of Electrical Engineering, 2002.

4 Hwang T S, Seok J K, Kim D H. Active damping control of linear hybrid stepping motor for cogging force compensation. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2006, **42**(2): 67−72

5 Jeon J W, Kim Y K. FPGA based acceleration and deceleration circuit for industrial robots and CNC machine tools. *Mechatronics*, 2002, **12**(4): 635−642

6 Carrica D, Funes M A, Gonzalez S A. Novel stepper motor controller based on FPGA hardware implementation. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2003, **8**(1), DOI: 10.1109/TMECH.2003.809160

7 Chen T C, Su Y C. High performance algorithm realization on FPGA for stepper motor controller. In: Proceedings of the 2008 SICE Annual Conference. Tokyo: IEEE, 2008. 1390−1395

8 Le N Q, Cho J U, Jeon J W. Application of velocity profile generation and closed-Loop control in step motor control system. In: International Joint Conference SICE-ICASE 2006. Bexco, Busan, Korea: IEEE, 2006. 3593−3598

9 Tsui K W H, Cheung N C, Yuen K C W. Novel modeling and damping technique for hybrid stepper motor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, **56**(1): 202−211

10 Carrica D O, Gonzalez S A, Benedetti M. A high speed velocity control algorithm of multiple stepper motors. *Mechatronics*, 2004, **14**(6): 675−684

11 Xi Yu-Geng. Large-scale systems control and complex networks — exploration and thinking. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(11): 1758−1768
(席裕庚. 大系统控制论与复杂网络 — 探索与思考. 自动化学报, 2013, **39**(11): 1758−1768)

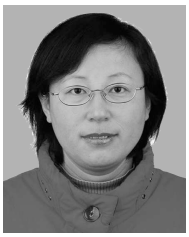
12 Marino R, Peresada S, Tomei P. Nonlinear adaptive control of permanent magnet step motors. *Automatica*, 2007, **31**(11): 1595−1604

13 Chiasson J N, Novotnak R T. Nonlinear speed observer for the PM stepper motor. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1993, **38**(10): 1584−1588

14 Blauch A J, Bodson M, Chiasson J. High-speed parameter estimation of stepper motors. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1993, **1**(4): 270−279

15 Defoort M, Nollet F, Floquet T, Perruquetti. A third-order sliding-mode controller for a stepper motor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, **56**(9): 3337−3346

张高阳 北京理工大学微小型制造研究所博士研究生. 2010 年获得北京理工大学机械与车辆学院硕士学位. 主要研究方向为自动化微装配, 控制技术.
E-mail: gaogao@bit.edu.cn
(**ZHANG Gao-Yang** Ph. D. candidate at the Micro Manufacturing Institute, Beijing Institute of Technology. He received his master degree from Beijing Institute of Technology in 2010. His research interest covers micro-assembly line control system technology.)



金 鑫 北京理工大学机械与车辆学院副教授. 2005 年获北京理工大学机械制造及其自动化系工学博士学位. 主要研究方向为微小型制造理论, 仿真和装备技术. 本文通信作者.
E-mail: goldking@bit.edu.cn
(**JIN Xin** Associate professor at the School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology. She received her Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2005. Her research interest covers micro and small manufacturing theory, simulation and technical aspects of the equipment. Corresponding author of this paper.)

张之敬 北京理工大学机械与车辆学院教授. 1982 年于日本东京大学获硕士学位. 主要研究方向为控制理论与应用, 自动化微装配和精密微检测技术.
E-mail: zhzhj@bit.edu.cn
(**ZHANG Zhi-Jing** Professor at the School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology. He received his master degree from University of Tokyo in 1982. His research interest covers control theory and applications, automated assembly of precision miniature parts, and precision micro detection technology.)