DOI: 10.3901/JME.2014.03.206

基于功率及转矩约束的大惯量伺服系统速度规划^{*}

郝仁剑 王军政 李 静 赵江波

(北京理工大学复杂系统智能控制与决策重点实验室 北京 100081)

摘要: 针对大惯量伺服系统提出基于功率及转矩约束的速度规划, 解决约束条件下响应速度慢和定位精度差的问题。提出一种基于三角函数的全程柔性加减速算法, 使速度与加速度曲线连续可导。同时采用二次曲线拼接, 保证不完全过程加速度仍然连续。以电动机驱动系统为模型, 利用过载特性, 设计基于额定功率及最大转矩双重约束下的速度规划, 使约束方式在最大转矩点平滑切换, 并以加减速角位移为给定, 确定匀速速度与加减速时间关系, 满足不同速度的加减速要求, 缩短速度响应时间。基于平均速度计算单个脉冲周期, 给出利于编程的左端点实现算法, 并引入间隔阈值变量, 大幅降低计算量, 算法适用于脉冲给定的伺服驱动系统。试验结果能够验证算法的有效性, 在实际应用中, 算法提高了定位精度, 得到很好的应用。

关键词: 功率及转矩约束; 大惯量伺服系统; 速度规划; 全程柔性; 左端点实现

中图分类号: TP273

Velocity Planning for Large Inertia Servo System Based on Power and Torque Constraints

HAO Renjian WANG Junzheng LI Jing ZHAO Jiangbo

(Key Laboratory of Intelligent Control and Decision of Complex System,

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract: To improve response rate and positioning accuracy of large inertia servo system, the velocity is planned based on power and torque constraints. Globally flexible acceleration and deceleration(a&d) algorithm based on trigonometric function is proposed, and a derivable and continuous velocity planning function is designed to reduce high-frequency component. Quadratic curve is employed to connect acceleration curve in incomplete process. Velocity planning algorithm is designed based on both nominal power and maximum torque constraints utilizing overload characteristic and maximum torque of the servo motor, and the condition of constraints is smoothly changed at the maximum torque point as well. The relation formula of constant speed and a&d time is given by utilizing displacement as command signal to satisfy different requirements. Single pulse interval is calculated based on mean velocity, and a left-end curve implementation method with interval threshold is designed to reduce computation cost for computer program. This method can be also used in other pulse-given servo systems. Testing and application results demonstrates the effectiveness and reliability of the proposed methods. The presented method improves target positioning accuracy and is successfully applied in test system.

Key words: power and torque constraints; large inertia servo system; velocity plan; globally flexible; left-end curve

0 前言

大惯量伺服系统遍及国民经济和军用等领域。负载惯量大, 动态性能差, 加减速过程不平稳冲击等问题影响了控制效果和定位精度。实际应用中, 受驱动机构的限制, 既需要针对大惯量伺服系统设

计优化控制算法如解析模型预测^[1]、鲁棒控制算法^[2]等, 也需要进行合理的速度规划, 即充分利用驱动机构性能实现最短时间内柔性加减速。大惯量伺服系统的控制过程可分为加速、匀速、减速三个阶段。加速和减速两个阶段对伺服系统的定位精度有很重要的影响。常用的速度规划方法有 T 形、S 形加减速方法。T 形曲线是工业界广泛采用的形式, 它是一种基于时间最优的曲线, 算法简单, 应用广泛, 但存在速度突变。S 形曲线是另一种应用广泛的加

^{*} 国家高技术研究发展计划资助项目(863 计划, 2011AA041002)·20120712 收到初稿, 20130719 收到修改稿

速曲线, 特点是速度变化平滑, 在接点处的位置、速度和加速度皆具有连续性, 但分段复杂, 且加速度存在突变^[3-5]。线性加减速^[6]通过改进其减速阶段, 取消低速定位阶段, 使伺服系统达到高速准确定位。另有三次多项式型自适应前瞻插补^[7]算法, 通过插补预处理自适应前瞻, 确定减速特征点的实际位置, 当数控系统实时插补到该减速点时, 将自动执行整体跨段参数化插补算法, 约束条件单一, 适用于数控加工领域。本文提出一种基于功率及转矩约束的全程柔性加减速算法, 实现了加减速柔性变化, 同时在约束条件下具有最短加减速时间, 满足不同速度要求; 对于脉冲给定伺服系统, 给出了利于编程的左端点实现算法, 解决了大惯量伺服系统功率及转矩约束条件下响应速度慢和定位精度差的问题。

1 加减速过程分析

1.1 角速度及角加速度阈值

大惯量伺服系统加减速过程中, 需要对角速度及角加速度进行规划。负载获得的最大功率和转矩受驱动机构性能限制, 角速度 $\omega(t)$ 及角加速度 $\varepsilon(t)$ 与功率 $P(t)$ 及转矩 $T(t)$ 的关系满足式

$$\begin{cases} P(t) = T(t)\omega(t) \\ T(t) = J\varepsilon(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中, J 为负载折算到驱动机构的转动惯量, t 为运动时间。此外, 较大角加速度会使弹性间隙发生形变, 导致摩擦阻力发生改变, 使电动机输出转角与实际位移量出现偏差, 因此需要合理的角速度及角加速度阈值。

1.2 加角速度曲线频域特性

角加速度频域特性体现了运动方向的振动和响应。高频谐波分量引起部件之间的交变力, 产生振动导致随机接触摩擦, 影响定位精度。图 1 为 T 形角速度给定时的角加速度幅值谱, 频谱含有较多高频分量。此外, 角加速度响应要求位置环有足够大的带宽, 因此要求角加速度给定应当含有较少的高频分量^[8-9]。

1.3 不完全过程中角加速度连续性

伺服系统要求实时控制, 可能出现未达最大速度即要求减速的情况, 即不完全过程。图 2 为 S 形加减速的不完全过程。在减速时刻 t' 直接进入减速阶段, 会造成角加速度的突变, 对系统造成冲击。

图 1 阶跃角加速度幅值谱

图 2 不完全过程示意图

为避免角加速度突变, 需要对减速的随机时刻 t' 的状态进行判断, 若时刻 t' 包含了之前角速度曲线的信息, 则能够实时规划出角加速度连续的减速曲线。通过以上分析, 大惯量伺服系统速度规划要保证合理的角加速度阈值和较少的高频分量, 保证不完全过程连续。

2 全程柔性加减速算法

2.1 算法构造

三角函数无限次连续可导, 其一阶导数得到的加速度也能满足要求, 利用其半个周期, 通过变换, 构造角速度函数如下

$$\omega(t) = \begin{cases} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi t}{t_1}\right)\right] \frac{\omega_c}{2} & 0 < t \leq t_1 \\ \omega_c & t_1 < t \leq \bar{t} + t_1 \\ \left[1 + \cos\left(\frac{\pi(t - \bar{t} - t_1)}{t_1}\right)\right] \frac{\omega_c}{2} & \bar{t} + t_1 < t \leq \bar{t} + 2t_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中, t_1 为加速时间, 由于加减速具有对称性, 加减速时间相等。 ω_c 为匀速角速度, $\bar{t}$ 为匀速运动时间。求导得角加速度函数, 如图 3 所示, S_a 为加减速段角位移在加减速时间段 $[0, t_1]$ 和 $[\bar{t} + t_1, \bar{t} + 2t_1]$, 角速度、角加速度分别为余弦、正弦函数, 实现了

连续柔性变化。

图 3 三角函数构造加减速曲线

2.2 全程柔性加减速算法

式(2)具有唯一的解析表达,在随机给定信号出现时,需要根据当前角速度和角加速度规划出连续减减速曲线。将加减速曲线分为加速、调节、减速三个区间,利用二次函数,将角速度、角加速度曲线拼接,实现角加速度不完全过程的连续变化。改进后角速度函数如下

$$\omega(t) = \begin{cases} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi t}{t_1}\right)\right] \frac{\omega_c}{2} & 0 < t \leq t_1' \\ \omega(t_1') + \int_{t_1'}^t \varepsilon(\tau) d\tau & t_1' < t \leq t_p + t_1' \\ \left[1 + \cos\left(\frac{\pi}{t_1}(t + \Delta t)\right)\right] \frac{\omega_c}{2} & t_p + t_1' < t \leq t_p + 2t_1' \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\Delta t = \pi - t_p - 2t_1'$, t_1 为理想加速时间, t_1' 为随机减速时刻, t_p 为调节时间, $\varepsilon(\tau)$ 为角加速度函数。对角速度函数求一阶导,得到角加速度函数为

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} \frac{\pi \omega_c}{2t_1} \sin\left(\frac{\pi t}{t_1}\right) & 0 < t \leq t_1' \\ k(t - t_1') + \sin\left(\frac{\pi}{t_1} t\right) & t_1' < t \leq t_p + t_1' \\ -\frac{\pi \omega_c}{2t_1} \sin(\pi + t_p + 2t_1' - t) & t_p + t_1' < t \leq t_p + 2t_1' \end{cases} \quad (4)$$

式中, $k = -2\sin(t_1'\pi/t_1)/t_p$ 为调节区间的角加速度斜率。如图 4 所示,若 t_1' 时进入调节区间,由给定调节时间 t_p 计算出角加速度曲线斜率,得到调节区间角加速度以及角速度函数的解析解,从而保证角加速度连续变化,可以根据需要设计不同的 t_p 以得到相应的调节曲线。

图 4 全程柔性加减速曲线

比较不同算法角加速度曲线频域特性如图 5 所示, T 形算法含有较多高频分量, S 形与全程柔性算法主瓣更宽, 高频分量更少。而后者相对于前者角加速度柔性变化, 角加加速度连续, 在每个区间内具有唯一的解析表达式, 参数较少, 算法简单, 对于位置环既定的脉冲给定伺服系统, 利于程序左端点实现。

图 5 不同加减速算法频谱

3 功率及转矩约束下速度规划

3.1 功率及转矩约束下加减速时间最优解

以交流永磁同步电动机额定功率和最大转矩为约束条件, 需要确定式(3)、(4)中参数 t_1 , ω_c 。考虑电动机工作时需要克服的摩擦负载以及惯性作用, 可得电动机的机械运动方程为

$$T_e - T_L - B\omega(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} \quad (5)$$

式中, T_e 为电磁转矩, T_L 为折算到电动机轴的负载转矩, J 为折算到电动机轴的转动惯量, $\omega(t)$ 为转子机械角速度, B 为轴承黏滞系数。式(5)左边 $\omega(t)$ 取额定角速度 ω_n , 并乘以 ω_n , 得到功率约束方程

为

$$\varepsilon(t)\omega(t)J = P(t) \leq P_{\max} = P_n - B\omega_n^2 - T_L\omega_n \quad (6)$$

式中, $\varepsilon(t)$ 为机械角加速度, P_n 为电动机额定功率, $P_{\max}$ 为负载获得的最大动态功率。对 $P(t)$ 在 $[0, t_1]$ 内求导取极值得到不等式(6)的解为

$$t_1 > \frac{3\sqrt{3}\pi\omega_c^2 J}{16P_{\max}} = t_{P_{\min}} \quad (7)$$

式中, $t_{P_{\min}}$ 为功率约束下加减速时间最小值, 功率最大值点在 $t = 2t_1/3$ 处。若以额定转矩 T_n 为约束, 加速转矩最大值点在 $t = t_1/2$, 见图 6。由式(5)也可得额定转矩约束下加减速时间最小值

$$t_{T_{\min}} = t_1 > \frac{8\pi\omega_c\omega_n J}{16P_{\max}} \quad (8)$$

图 6 全程柔性加减速功率/转矩曲线

3.2 匀速速度取值范围确定

由于 $t_{T_{\min}} > t_{P_{\min}}$, 在功率约束下, 加速过程中必然存在过载情况, 因此需要考虑电动机过载能力。加速过程中电磁转矩最大值 $T'_{\max}$ 存在于 $\varepsilon(t)$ 峰值时刻, 过载运行要求 $T'_{\max}$ 小于电动机最大转矩 $T_{\max}$

$$T'_{\max} = \frac{8P_{\max}}{3\sqrt{3}\omega_c} \leq T_{\max} \quad (9)$$

由式(9)可得过载时间为

$$t_o = \frac{2t_1}{\pi} \arcsin \frac{T_n}{T'_{\max}} \quad (10)$$

由式(7)、(9)可知, 在额定功率约束下满足最大转矩要求 ω_c 选取范围为

$$\omega_{\min} = \frac{8P_{\max}}{3\sqrt{3}T_{\max}} \leq \omega_c \leq \omega_n \quad (11)$$

根据式(10)以及电动机过载特性曲线, 可以选择合适的过载时间和最大转矩。

3.3 功率与转矩约束切换

由式(7)、(11)可得到加减速时间 t_1 最小值和匀速角速度 ω_c 的范围。对于大惯量伺服系统, 需要根据给定角位移 S 确定 ω_c 具体值。如图 3 所示, 由三角函数对称性, 加减速段角位移 S_a 满足关系式

$$S_a = \omega_c t_1 = \frac{3\sqrt{3}\pi\omega_c^3 J}{16P_{\max}} \quad (12)$$

式中, S_a 为 ω_c 的三次函数, 在功率约束下, S_a 满足不等式

$$S_a > S_{a\min} = \frac{3\sqrt{3}\pi\omega_{\min}^3 J}{16P_{\max}} \quad (13)$$

图 7 中 bc 段为功率约束下 $S_a - \omega_c$ 曲线, 当 $S_a < S_{a\min}$ 时, 由式(9)可知此时 T_e 超过最大转矩, 将式(7)改写为

$$t_1 = \frac{3\sqrt{3}\pi\omega_c\omega_{\min} J}{16P_{\max}} \quad (14)$$

此时, $T'_{\max} = T_{\max}$ 。由式(9)将式(12)改写为

$$S_a = \omega_c^2 \frac{3\sqrt{3}\pi\omega_{\min} J}{16P_{\max}} \quad (15)$$

S_a 为 ω_c 的二次函数, 图 7 中 ab 段实线部分即为最大转矩约束下 $S_a - \omega_c$ 曲线。此外, bc 段和 ad 段分别为额定功率约束与额定转矩约束下 $S_a - \omega_c$ 曲线。

图 7 加减速段合位移与匀速速度关系

通过额定功率与最大转矩约束求解出最小加速时间和匀速角速度, 从而在最大转矩点实现了两种约束的平滑切换, 如图 8 所示。

图 8 功率/转矩极值与匀速角速度关系

3.4 S 形算法约束条件分析

对于分段 S 形算法, 可以证明最大功率和最大转矩点均位于图 2 中的 a 点。 ab 段角速度与角加速度方程为

$$\begin{cases} \omega(t) = -\frac{n^2\omega_c}{2(n-1)t_1^2}t^2 + \frac{n^2\omega_c}{(n-1)t_1}t \\ \varepsilon(t) = -\frac{n^2\omega_c}{(n-1)t_1^2}t + \frac{n^2\omega_c}{(n-1)t_1} \end{cases} \quad (16)$$

式中, n 为加速时间系数, 即加减速时间为 t_1/n 。由此得到功率及转矩约束下的加速时间分别为

$$t_1 \geq \frac{(2n-3)n\omega_c^2 J}{2(n-1)^2 P_{\max}} = T_{P\min} \quad (17)$$

$$t_1 \geq \frac{n\omega_c J}{(n-1)T_{\max}} = T_{T\min} \quad (18)$$

由式(19)可知, 不同约束条件加速时间与加速时间系数、匀速角速度及最大过载转矩选取有关

$$\frac{T_{P\min}}{T_{T\min}} = \frac{2n-3}{2n-2} \frac{\omega_c}{\omega_n} \frac{T_{\max}}{T_n} \quad (19)$$

4 算法左端点实现

上述算法给出了角速度函数表达式, 在实际脉冲给定的伺服单元中, 需要转化为脉冲实现函数, 见图 9。给定脉冲时刻分别为 t_0 、 t_1 , 脉冲步长为 λ , 在时间间隔 $[t_0, t_1]$ 内, 伺服电动机平均速度为

$$\bar{\omega} = \frac{\lambda}{t_1 - t_0} \quad (20)$$

式中, λ 为固定值, $\bar{\omega} = \lambda f_0$, 因此矩形 $s_0 s'_1 t_1 t_0$ 的面积为 1。脉冲实现函数需要满足

$$\int_{t_{n-1}}^{t_n} f(t)dt = 1 \quad (21)$$

图 9 $f(t)$ 的脉冲实现曲线

为减少算法复杂性, 采用左端点实现函数, 即图 9 中 c_n 与 a_n 重合, 得到左端点实现的表达式

$$t_i = t_{i-1} + \frac{1}{f_{i-1}} \quad (22)$$

初始时刻 t_0 由 $\int_0^{t_0} f(t)dt = 1$ 解出。如图 10 为最大脉冲频率 $f_{\max} = 1$ kHz, 加速时间为 1 s 的左端点实现曲线, $t_0 = 0.1069$ s, 即第一个脉冲周期。

图 10 $f(t)$ 左端点实现曲线

在接近匀速角速度时, 时间间隔迅速缩短, 为简化计算, 缩减程序运行时间, 引入间隔阈值 T_{th} , 用样本 t_n 代替 t_i , 将式(22)改写为

$$t_n = t_{i-1} + \frac{1}{f_{i-1}} \quad t_n - t_{i-1} < T_{th} \quad (23)$$

改进后既大幅减少计算量, 同时可保证平均速度不变。表 1 给出了加速时间为 1 s 时, 不同最大脉冲频率 $f_{\max}$ 及间隔阈值 T_{th} 的样本 t_n 个数。

表 1 不同间隔阈值下 t_n 样本个数

初始时刻/s	最大脉冲频率/kHz	样本个数/个			
		$T_{th}=0.001$ s	$T_{th}=0.002$ s	$T_{th}=0.004$ s	$T_{th}=0$ s
0.106 9	1	500	294	170	500
0.067 3	4	681	381	206	2 000
0.054 3	8	763	413	218	4 000
0.042 4	16	827	473	227	8 000

5 试验验证与分析

以安川大容量电动机为例验证算法效果。采用全程柔性算法对不同约束条件下, 加减速效果进行验证。永磁同步电动机相关参数如表 2 所示。

表 2 伺服系统相关参数

参数名称	数值	参数名称	数值
最大电流/A	32.8	额定角速度/(rad/s)	157
电动机容量/kW	4.4	电动机侧转动惯量/(kg·m ²)	0.3
额定转矩 [*] /(N·m)	28.4	轴承黏滞系数/(N·s/rad)	0.001
瞬时最大转矩/(N·m)	71.1	负载转矩/(N·m)	10

注：*根据过载特性曲线，取最大转矩为额定转矩的 2 倍，允许过载时间 10 s。

由表 2 参数可求出功率约束与转矩约束切换点的匀速角速度 $\omega_{\min}=76$ rad/s，负载最大动态功率 $P_{\max}=2.804$ kW。折算到电动机侧的负载转矩 $T_L=10$ N·m，得到加减速及过载运行时间如表 3、表 4 所示。

表 3 不同约束条件下加减速时间

约束条件	加减速时间/s				
	$\omega_c=31$ rad/s	$\omega_c=52$ rad/s	$\omega_c=76$ rad/s	$\omega_c=105$ rad/s	$\omega_c=136$ rad/s
额定功率约束	*	*	0.63	1.21	2.04
最大转矩约束	0.26	0.43	0.63	*	*
额定转矩约束	0.83	1.38	2.01	2.76	3.59
功率转矩约束	0.26	0.43	0.63	1.21	2.04

注：*超出最大转矩或额定功率。

表 4 不同约束条件下过载运行时间

约束条件	过载运行时间/s				
	$\omega_c=31$ rad/s	$\omega_c=52$ rad/s	$\omega_c=76$ rad/s	$\omega_c=105$ rad/s	$\omega_c=136$ rad/s
额定功率约束	*	*	0.21	0.58	1.44
最大转矩约束	0.09	0.14	0.21	*	*
额定转矩约束	0	0	0	0	0
功率转矩约束	0.09	0.14	0.21	0.58	1.44

注：*超出最大转矩或额定功率。

由表 3、表 4 及图 11 可知，功率及转矩约束能够满足不同速度的加减速要求，相对于额定转矩约束，该算法能够充分利用电动机过载性能，大幅减少了加减速时间。

图 11 匀速角速度 ω_c 与加减速时间 t_1 曲线

为进一步验证算法效果，在某测试系统^[10] 中进行了验证。图 12、图 13 给出了 S 形算法与本文算法加减速阶段转速反馈电压曲线。两者在中间过程曲线均比较平滑，但 S 形算法在加速度斜率变化处，速度会有较大波动。

图 12 S 形算法转速反馈电压曲线

图 13 本文算法转速反馈电压曲线

以实际应用^[10]为例给出了不同算法在不同脉冲给定频率下的定位误差和角度测量误差，如表 5 所示。

表 5 不同 ω_c 给定下各算法定位误差

算法	定位误差 /mm			
	$f=1$ kHz	$f=4$ kHz	$f=8$ kHz	$f=16$ kHz
T 形	0.02	0.04	0.08	0.14
5 段 S 形	0.02	0.02	0.07	0.10
7 段 S 形	0.02	0.02	0.04	0.10
全程柔性	0.01	0.02	0.02	0.04

算法	角度测量误差/(°)			
	$f=1$ kHz	$f=4$ kHz	$f=8$ kHz	$f=16$ kHz
T 形	0.001 2	0.002 4	0.004 8	0.008 4
5 段 S 形	0.001 2	0.001 2	0.0700	0.006 0
7 段 S 形	0.001 2	0.001 2	0.002 4	0.006 0
全程柔性	0.002 4	0.001 2	0.001 2	0.002 4

测试系统要求测量精度为 0.006°，试验结果表明，全程柔性算法实现速度和加速度柔性变化，具

有更好的定位精度, 满足系统对测量精度的要求。

6 结 论

(1) 针对大惯量位置伺服系统, 提出基于三角函数的全程柔性加减速算法, 实现速度与加速度柔性变化, 减少加速度高频分量, 提高了定位精度。

(2) 以电动机驱动的大惯量伺服系统为模型, 提出基于额定功率和最大转矩双重约束下的速度规划算法, 充分利用电动机过载特性, 最大限度提高大惯量伺服系统的响应速度, 满足不同匀速速度的加减速要求。

(3) 提出含有间隔阈值的左端点实现算法, 大幅降低计算量, 适用于脉冲给定伺服系统。

参 考 文 献

- [1] 汪正军, 王军政, 马立玲, 等. 大惯量伺服系统解析模型预测控制[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(11): 1307-1312.
WANG Zhengjun, WANG Junzheng, MA Liling, et al. Explicit model predictive control for large inertia servo system[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2011, 31(11): 1307-1312.
- [2] 陆豪, 李运华, 田胜利, 等. 驱动大惯量低刚度负载的推力矢量控制电动伺服机构的 μ 综合鲁棒控制[J]. 机械工程学报, 2011, 47(2): 180-188.
LU Hao, LI Yunhua, TIAN Shengli, et al. μ synthesis robust control of thrust vector control electric servo mechanism driving large inertia and low stiffness load[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(2): 180-188.
- [3] 潘海鸿, 杨微, 陈琳, 等. 全程 S 曲线加减速控制的自适应分段 NURBS 曲线插补算法[J]. 中国机械工程, 2010, 21(2): 190-196.
PAB Haihong, YANG Wei, CHEN Lin, et al. Adaptive piecewise nurbs curve interpolator algorithm for entireness process S-curve ACC/ DEC control[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(2): 190-196.
- [4] 石川, 赵彤, 叶佩青, 等. 数控系统 S 曲线加减速规划研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(12): 1421-1425.
SHI Chuan, ZHAO Tong, YE Peiqing, et al. Study on S-shape curve acceleration and deceleration control on NC system[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(12): 1421-1425.
- [5] LIN M T, TSAI M S, YAU H T. Development of a dynamics-based NURBS interpolator with real-time look-ahead algorithm[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47: 2246-2262.
- [6] 郭新贵, 李从心, 阮雪榆. 采用线性加减速伺服系统的快速准确定位方法[J]. 机械工程学报, 2003, 39(7): 74-78.
GUO Xingui, LI Congxin, RUAN Xueyu. Rapid and accurate positioning method of CNC system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(7): 74-78.
- [7] 冷洪滨, 郭义杰, 潘晓弘. 三次多项式型微段高速自适应前瞻插补方法[J]. 机械工程学报, 2009, 45(6): 73-79.
LENG Hongbin, WU Yijie, PAN Xiaohong. Adaptive prospective interpolation method for high speed machining of micro line blocks based on the cubic polynomial model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(6): 73-79.
- [8] JEON J W, HA Y Y. A generalized approach for the acceleration and deceleration of industrial robots and CNC machine tools[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 47(1): 133-139.
- [9] 何王勇, 唐小琦, 李勇波. 基于有限元的双滚珠丝杠同步驱动轴动力学建模与分析[J]. 制造技术与机床, 2010(12): 83-86.
HE Wangyong, TANG Xiaoqi, LI Yongbo. Dynamics modeling and analysis of a motion axis driven by a synchronous dual ball screw based on FEA[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2010(12): 83-86.
- [10] 李静, 王军政, 汪首坤, 等. 基于双靶面的火炮动态稳定精度测试方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(10): 2328-2333.
LI Jing, WANG Junzheng, WANG Shoukun, et al. Artillery dynamic stability precision test method based on dual-target[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(10): 2328-2333.

作者简介: 郝仁剑, 男, 1989 年出生, 博士研究生。主要研究方向为运动驱动与控制。

E-mail: haorenjian@gmail.com

王军政(通信作者), 男, 1964 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为运动驱动与控制, 电动、电液伺服系统静态性能测试, 基于图像的动态目标检测与跟踪技术。

E-mail: wangjz@bit.edu.cn