

# 超精密点对点运动三阶轨迹规划精度控制\*

穆海华 周云飞 严思杰 韩爱国

(华中科技大学国家数控系统工程技术研究中心 武汉 430074)

**摘要:** 研究一种优化的超精密点对点运动三阶轨迹规划算法及其精度控制策略。在简要分析三阶轨迹轮廓可能情形的基础上, 建立三个约束基准用来预判以上情形: 速度—加速度基准、位移—加速度基准和位移—速度基准, 依据该基准与系统约束, 提出一种考虑轨迹全过程的预处理方法, 并给出时间优化的轨迹规划算法。考虑算法离散实现时的精度损失, 提出一种轨迹规划内部整数积分策略, 避免因浮点积分操作所造成的数据漂移而引起的精度失败。此外, 提出一种基于位置修正因子的补偿方法, 克服切换时间圆整所引起的终点位置偏差。实例证明提出算法的有效性和可靠性。该算法已成功应用于半导体加工装备研发中。

**关键词:** 点对点运动 轨迹规划 约束基准 精度控制

中图分类号: TP391

## Precision Control of Third-order Profile Planning for High Accuracy Point-to-point Motion System

MU Haihua ZHOU Yunfei YAN Sijie HAN Aiguo

(National Numerical Control System Engineering & Technology Research Center,  
Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074)

**Abstract:** A third-order profile planning method and precision control strategies for point-to-point motion are studied. Several criterions are presented relying on all possible instances for third-order profile planning. Based on these criteria and dynamic constraints, fast and accurate algorithm of profile planning with time-optimality by preprocessing the entire profile as a whole is described. Accuracy losses in discrete time implementation are considered. As a result, an internal integer data integration strategy and a compensation approach based on correcting factor are investigated. Finally, experiment results demonstrate the effectiveness and reliability of the proposed methods. The presented method is successfully applied in semiconductor manufacturing equipments.

**Key words:** Point-to-point motion Profile planning Limitation criteria Precision control

### 0 前言

点对点运动已广泛应用于现代高精度定位系统中, 如机器人和半导体加工。这类运动对精度和效率的要求极高, 甚至要求纳米级精度, 而轨迹规划是超精密运动的重点和难点之一, 其轨迹规划精度直接决定了运动精度和性能, 因此, 与此相适应的快速精确的轨迹规划算法成为了现代超精密运动系统必须解决的问题, 是提高竞争力的必要手段。

轨迹规划负责计算给定运动在每个采样周期的加速度、速度和位置等参考数据, 以提供给后续的数字控制器使用。高精度点对点轨迹规划应具有以

下基本目标: 小的冲击或残余振动、优化的运动时间和高的轨迹精度。众所周知, 二阶轨迹运动能获得良好的快速性, 但由于大多数实际系统的柔性或依赖性, 当系统作高速运动时, 二阶轨迹运动容易激起残余振动, 需要增加稳定时间来消散这些残余振动, 以满足终点位置的精度要求<sup>[1-2]</sup>。随着加工精度与生产率的不断提高, 三阶轨迹或更高阶轨迹规划已在实际应用中被采用, 使用这些参考轨迹既能获得运动快速性也能获得小的系统残余振动<sup>[3]</sup>。目前已提出了很多可行的轨迹规划及光滑处理的方法<sup>[4-6]</sup>, 但这些方法通常显著增加轨迹规划的执行时间, 影响效率。而且, 现有研究中, 轨迹规划的数据生成几乎全部采用浮点数积分方法, 必然导致结果数据的漂移(即使采用 64 位双精度浮点数), 引起轨迹计算精度下降, 但现有研究尚未对其进行补偿。

\* 国家自然科学基金(50245011)和国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2003CB716206)资助项目。20070308 收到初稿, 20070926 收到修改稿

此外，轨迹规划中各切换点的时间圆整也会引起规划终点位置与理论位置之间的偏差，已有文献[6]提出了加速度均分误差法，该方法能简单地处理二阶位置轨迹中因圆整引起的误差，但该方法难以应用到三阶或更高阶的轨迹规划。因此，本文提出了一种三阶轨迹规划方法，该方法极大改善了以上不足，并能方便地应用于工程实践。其主要方面包括：①分析轨迹规划中可能存在的各种情况。②建立了速度—加速度约束基准、位移—加速度约束基准和位移—速度约束基准，这些约束基准用于以上各种情形的预判，为算法公式推导提供依据。③考虑轨迹整体规划过程，并结合约束基准与可能情形，对运动轨迹算法公式进行了推导，给出了整条轨迹的全局预处理过程，实现了时间优化。④在以上分析基础上，提出了轨迹规划的精确算法，给出了算法的实现流程。⑤考虑算法计算机实现时的精度损失，提出了内部整数积分方法和基于位置修正因子的精度补偿方法。该算法能实现高效的轨迹规划，大大缩短采样中断计算时间，为实时系统采样频率的提高提供可能，同时纠正了算法离散实现时的精确损失，为超精密加工提供有效的轨迹规划方法。

### 1 可能轨迹情形分析与约束基准建立

点对点运动为两点之间的运动，要求保证终点位置精度，一般采用直线运动以满足运动的快速性，且初始位置和终点位置的加速度与速度均为零。点对点轨迹规划的基本功能就是计算各采样时间的轨迹理论数据。图 1 为典型的三阶对称位置轨迹，部分 I 为常加加速度段，部分 II 为常加速度段，部分 III 为常速段。改变给定约束条件，轨迹中的部分 II 或部分 III 可能不再存在，也就是轨迹规划存在着多种

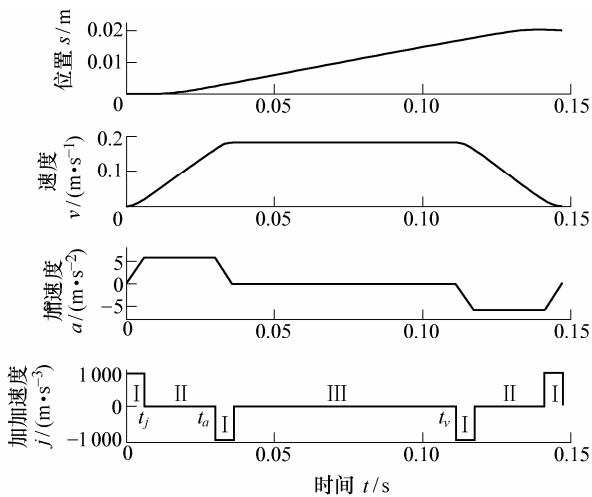


图 1 点对点运动典型轮廓

可能情形。通过分析，总结出各种情形相应的约束特征，并进行相应计算公式的推导，归纳出用以判别以上各种情形的准则与步骤，由此直接进行轨迹的计算与规划，精确规划出整个运动轨迹是三阶轨迹规划的任务。

#### 1.1 特征值定义

(1) 当加速度达到给定最大值(暂不考虑给定最大速度与运动位移)，加速度轨迹以对称形式在最短时间内将加速度与速度变为零时，对应的最大速度与位移值，分别记为  $v\_a\_lim$ ,  $s\_a\_lim$ 。

(2) 当速度达到最大值(暂不考虑给定运动位移)，加速度轨迹以对称形式在最短时间内将加速度和速度变为零时，对应的位移值，记为  $s\_v\_lim$ 。

#### 1.2 可能轨迹情形

由前述可知，不同的约束条件可能决定不同的轨迹形状。对三阶轨迹规划而言，其约束条件包括最大加加速度，最大加速度，给定运动速度及终点位置。实际应用中存在 6 种可能轨迹形状，分别见图 2~5。注：以下描述中的速度和位移的大与小是指分别相对特征值  $v\_a\_lim$ ,  $s\_a\_lim$ 。

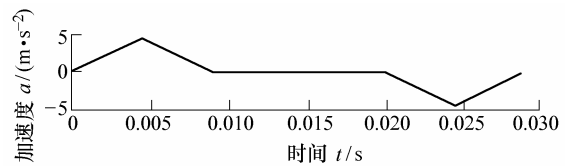


图 2 速度小位移大的情况

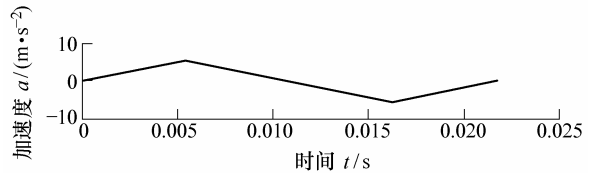


图 3 速度大位移小的情况

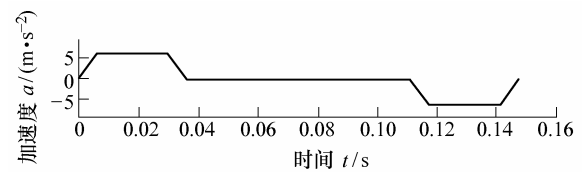


图 4 速度大位移大，位移更大的情况

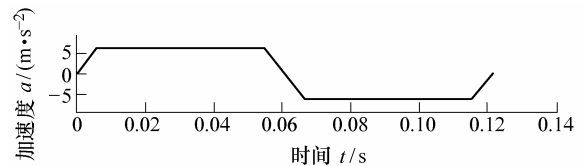


图 5 速度大位移大，速度更大的情况

这 6 种可能情形的轨迹特征与约束特征可归纳如下。

(1) 速度小位移大的情况。由于速度太小，加速度未到达最大值之前，速度就已满足，但运动位

移较大, 仍需以最大速度继续运动。这种情况的加速度轨迹形状为三角形且正负三角形不相连, 即轨迹中含有常速段。

(2) 位移小速度大的情况。由于位移太小, 加速度与速度均未到达最大值之前, 运动位移就已满足。这种情况的加速度轨迹形状为三角形且正负三角形相连, 即轨迹中无常速段。

(3) 速度小位移也小的情况。加速度未达到最大值之前, 最大速度或位移就已满足, 加速度轨迹形状为三角形, 但正负三角形是否相连取决于给定速度与位移满足的时间先后。

1) 速度更小的情况。这种情况下, 最大速度满足时, 运动位移尚未满足, 仍需以最大速度继续运动, 即加速度轨迹中正负三角形不相连, 含有常速段, 该情况与情况(1)类似。

2) 位移更小的情况。这种情况下, 运动位移满足时, 最大速度仍未到达, 因此运动中无常速段, 该情况与情况(2)类似。

(4) 位移大速度也大的情况。当加速度到达最大值时, 最大速度与位移尚未满足, 仍需按最大加速度继续加速, 但是最大速度先满足还是运动位移先满足, 取决于进一步比较。显然, 这种情况的加速度轨迹为梯形。

1) 位移更大的情况。这种情况下, 最大速度先满足, 但仍需以最大速度继续运动以满足位移要求, 即加速度轨迹中正负梯形不相连, 含有常速段。

2) 速度更大的情况。这种情况下, 运动位移先满足, 此时加速度轨迹中不含常速段, 即加速度轨迹中正负梯形相连。

### 1.3 约束基准

为了进行轨迹情形的预判断, 首先确定各种情形的约束特征, 建立相应的约束基准。假设系统约束条件如下: 最大加加速度  $j_{\max}$ , 最大加速度  $a_{\max}$ , 最大速度  $v_{\max}$ , 给定运动速度  $v$ , 终点位置  $s$ 。

(1) 速度—加速度约束基准, 当  $v > v_{\max}$  时,  $v = v_{\max}$ , 若位移约束  $s > s_a_{\lim}$  且速度约束  $v < v_a_{\lim}$  时, 则加速度尚未达到最大值, 加加速度时间段由给定速度确定, 见图2。

(2) 位移—加速度约束基准, 当  $v > v_{\max}$  时,  $v = v_{\max}$ , 若位移约束  $s < s_a_{\lim}$  且速度约束  $v > v_a_{\lim}$  时, 则加速度尚未达到最大值, 加加速度时间段由运动位移确定, 见图3。

(3) 位移—速度约束基准 1, 当  $v > v_{\max}$  时,  $v = v_{\max}$ , 若位移约束  $s < s_a_{\lim}$  且速度约束  $v < v_a_{\lim}$  时, 则加速度尚未达到最大值, 加加速度时间段由运动位移确定还是给定速度确定, 需要进一步分析。

判别方法如下。

1) 当位移约束  $s > s_v_{\lim}$  时, 加加速度时间段由最大速度确定, 见图 2。

2) 当位移约束  $s < s_v_{\lim}$  时, 加加速度时间段由运动位移确定, 见图 3。

(4) 位移—速度约束基准 2, 当  $v > v_{\max}$  时,  $v = v_{\max}$ , 若位移约束  $s > s_a_{\lim}$  且速度约束  $v > v_a_{\lim}$  时, 加速度已达到最大值, 但最大加速度时间段由运动位移确定还是给定速度确定, 需要进一步分析。判别方法如下。

1) 当位移约束  $s > s_v_{\lim}$  时, 最大加速度时间段由给定速度确定, 见图 4。

2) 当位移约束  $s < s_v_{\lim}$  时, 最大加速度时间段由运动位移确定, 见图 5。

约束基准的建立, 根据实际物理限制, 可用来实现图 1 中各部分的时间优化。该基准也为后续公式推导提供依据。

## 2 公式推导与算法实现

由分析可知, 可能轨迹情形的确定取决于两个问题: 其一是加速度轨迹形状, 即三角形或梯形; 其二是加速度轨迹形状是否相连, 即轨迹中的三角形或梯形是否连续。因为不同的形状及其是否相连对应着不同的约束计算公式, 因此根据上述两个问题, 即可直接进行相应的公式推导。

### 2.1 定义

定义三个关键变量  $t_j$ ,  $t_a$ ,  $t_v$ , 如图 1 所示。采用对称梯形加速度曲线的三阶轨迹可由此三个变量唯一确定。该三个变量的使用可大大简化公式的推导过程, 并易于高阶轨迹规划的扩展。这里称变量  $t_a$  和  $t_v$  为速度时间与位移时间。此外, 定义以最大加加速度加速, 直到加速度达到其最大值时所对应的时间为  $t_{\text{tab}}$ , 即  $t_{\text{tab}} = a_{\max}/j_{\max}$ 。该变量用来关联最大加加速度与最大加速度, 用以方便建立算法所需的加速度表, 实现最大加加速度限制的隐藏。

### 2.2 公式推导

按照前述分析, 计算公式可分成以下四种情况进行推导。这里公式推导直接利用几何曲线的对称性与图形面积求积分法, 而不采用一般的分段函数与其边界条件求积分法, 这样可极大地简化推导过程。满足工程应用中简单、直接的要求。

(1) 加速度形状为三角形且正负相连的情况。如图 3 所示, 最大加加速度时间段由运动位移决定, 位移与时间的关系为

$$s = 2a_{\max}t_j^3/t_{\text{tab}} \quad (1)$$

即最大加加速度时间段为

$$t_j = \sqrt[3]{st_{\text{tab}} / (2a_{\text{max}})} \quad (2)$$

(2) 加速度形状为三角形且正负不相连的情况。如图2所示,这种情况存在常速段,最大加加速度时间段由给定速度决定,速度与时间的关系为

$$v = a_{\text{max}} t_j^2 / t_{\text{tab}} \quad (3)$$

即最大加加速度时间段为

$$t_j = \sqrt{vt_{\text{tab}} / a_{\text{max}}} \quad (4)$$

位移时间  $t_v$  与运动位移、给定速度之间的关系为

$$s = vt_v \quad (5)$$

即位移时间  $t_v$  计算为

$$t_v = s / v \quad (6)$$

(3) 加速度形状为梯形且正负相连的情况。如图5所示,这种情况存在最大加速度段,最大加加速度时间段由最大加速度确定,最大加速时间段则由运动位移确定,存在以下关系。

最大加加速度时间段与最大加速度的关系为

$$a_{\text{max}} = j_{\text{max}} t_j \quad (7)$$

即最大加加速度时间段为

$$t_j = a_{\text{max}} / j_{\text{max}} \quad (8)$$

速度时间  $t_a$  与运动位移的关系为

$$s = a_{\text{max}} [(t_a + t_{\text{tab}} / 2)^2 - t_{\text{tab}}^2 / 4] \quad (9)$$

即速度时间  $t_a$  为

$$t_a = \sqrt{(s / a_{\text{max}} + t_{\text{tab}}^2 / 4)} - t_{\text{tab}} / 2 \quad (10)$$

(4) 加速度形状为梯形且正负不相连的情况。如图4所示,这种情况存在最大加速度段与常速段,最大加加速度时间段由最大加速度确定,最大加速时间段由给定速度确定,常速时间段则由运动位移确定,存在以下关系。

由最大加速度确定最大加加速度时间段的计算公式同方程式(8)。

速度时间  $t_a$  与最大加速度的关系为

$$v = a_{\text{max}} t_a \quad (11)$$

即速度时间  $t_a$  为

$$t_a = v / a_{\text{max}} \quad (12)$$

位移时间  $t_v$  与运动位移、给定速度之间的关系式同方程式(5)。位移时间  $t_v$  计算公式同方程式(6)。

### 2.3 算法实现

本质上,三阶轨迹规划即为确定三个关键时间  $t_j$ ,  $t_a$ ,  $t_v$  的计算。因此,其轨迹规划的精确算法与步骤如下。

(1) 计算限制值  $v\_a\_lim$ ,  $s\_a\_lim$ ,  $s\_v\_lim$ , 计算公式为

$$v\_a\_lim = a_{\text{max}}^2 / j_{\text{max}} \quad (13)$$

$$s\_a\_lim = 2a_{\text{max}}^3 / j_{\text{max}}^2 \quad (14)$$

$$s\_v\_lim = v[P(2\sqrt{v/j_{\text{max}}}) + Q(v/a_{\text{max}} + a_{\text{max}}/j_{\text{max}})] \quad (15)$$

式中,  $P$ 、 $Q$  为两个整型系数,满足以下约束

$$\begin{cases} P + Q = 1 \\ PQ = 0 \end{cases} \quad (16)$$

且当  $vj_{\text{max}} < a_{\text{max}}^2$  时,  $P = 1$ ; 否则,  $P = 0$ 。

(2) 当  $v > v_{\text{max}}$  时,  $v = v_{\text{max}}$ 。若速度限制  $v < v\_a\_lim$  且位移限制  $s > s\_a\_lim$ , 由方程式(4)确定加加速度时间  $t_j$ ; 由方程式(6)确定位移时间  $t_v$ ; 这种情况下,  $t_a = t_j$ 。

(3) 当  $v > v_{\text{max}}$  时,  $v = v_{\text{max}}$ 。若速度限制  $v > v\_a\_lim$  且位移限制  $s < s\_a\_lim$ , 由方程式(2)确定加加速度时间  $t_j$ ; 这种情况下,  $t_a = t_j$ ,  $t_v = 2t_j$ 。

(4) 当  $v > v_{\text{max}}$  时,  $v = v_{\text{max}}$ 。若速度限制  $v < v\_a\_lim$  且位移限制  $s < s\_a\_lim$  且位移约束  $s > s\_v\_lim$ , 由方程式(4)确定加加速度时间  $t_j$ ; 由方程式(6)确定位移时间  $t_v$ ; 这种情况下,  $t_a = t_j$ 。

(5) 当  $v > v_{\text{max}}$  时,  $v = v_{\text{max}}$ 。若速度限制  $v < v\_a\_lim$  且位移限制  $s < s\_a\_lim$  且位移约束  $s < s\_v\_lim$ , 由方程式(2)确定加加速度时间  $t_j$ ; 这种情况下,  $t_a = t_j$ ,  $t_v = 2t_j$ 。

(6) 当  $v > v_{\text{max}}$  时,  $v = v_{\text{max}}$ 。若速度限制  $v > v\_a\_lim$  且位移限制  $s > s\_a\_lim$  且位移约束  $s > s\_v\_lim$ , 由方程式(8)确定加加速度时间  $t_j$ ; 由方程式(12)确定速度时间  $t_a$ ; 由方程式(6)确定位移时间  $t_v$ 。

(7) 当  $v > v_{\text{max}}$  时,  $v = v_{\text{max}}$ 。若速度限制  $v > v\_a\_lim$  且位移限制  $s > s\_a\_lim$  且位移约束  $s < s\_v\_lim$ , 由方程式(8)确定加加速度时间  $t_j$ ; 由方程式(10)确定速度时间  $t_a$ ; 这种情况下,  $t_v = t_a + t_j$ 。

## 3 精度控制策略

在轨迹规划的离散实现过程中,存在精度损失问题,包括:①多次浮点数积分操作引起误差累积,导致结果数据漂移。②切换时间的圆整引起精度超差。以上两个问题都会导致规划的终点位置偏离理想位置,造成精度失败,在超精密加工中必须予以考虑与补偿。下面给出了两种对应的方法,即内部整数积分策略与位置修正因子补偿策略,用来解决精度损失问题。

众所周知,速度轨迹与位置轨迹采用加速度积分进行计算,即加速度的一重积分得到速度轨迹,加速度的二重积分得到位置轨迹。三阶轨迹生成的积分计算公式为

$$\begin{cases} v(k) = v(k-1) + a(k) \\ s(k) = s(k-1) + v(k) \end{cases} \quad (17)$$

实际工程中,加速度一般以加速度表形式给出。

设加速度表长度为  $n_{\text{tab}}$ , 加速度表可表示为以下形式:  $a(0), a(1), \dots, a(n_{\text{tab}}-2), a(n_{\text{tab}}-1)$ 。加速度表的最后有效元素为最大加速度值, 即  $a_{\text{max}}=a(n_{\text{tab}}-1)$ 。

### 3.1 内部整数积分策略

在轨迹计算内部采用整数积分操作, 克服浮点数积分或累加必然造成的结果漂移。因整数计算是完全精确而浮点数计算则存在精度损失, 采用该策略所产生的所有轨迹数据总是围绕其理论值微小波动, 而不致产生因多次积分引起误差累积而造成大的数据漂移。计算中, 为了便于与伺服环中其他单元接口, 输入和输出数据仍采用浮点数表示。

首先, 为了实现内部与外部输入输出数据的转化, 定义一组单位转化因子及其倒数值。内部整数积分策略基本过程为: 运动输入参数通过转化因子全部转化为内部整数, 按照前述的轨迹规划算法进行轨迹规划, 确定出三个关键时间, 继而确定加速度轨迹中所有拐点处的时间, 之后轨迹数据的产生通过获取对应的内部整型加速度值并进行内部整数积分操作, 即可获取以内部单位表示的整型轨迹数据, 然后再通过转化因子的倒数将其转化为国际单位的浮点数数据。此外, 因存在切换时间的圆整误差, 还需对该误差进行补偿, 该部分算法见下一部分。对单位转化因子的计算, 只需首先确定两个基本量: 位置当量与系统采样周期, 所有其他单位转化因子可由这两个基本量计算得到, 包括加加速度单位转化因子, 加速度单位转化因子, 速度单位转化因子等。需要特别注意位置当量的选择, 一般而言, 位置当量选择越小对精度越有利。因此位置当量的选择应遵循以下原则: 所采用的整数最大范围所能表示出的浮点数值应稍微大于实际所要求的运动行程, 如行程为  $\pm 0.5 \text{ m}$ , 采用 32 位整数, 则位置当量可选为  $0.25 \text{ nm}(1.0/2^{32} \approx 0.232 \text{ 83 nm})$ 。

### 3.2 位置修正因子补偿策略

轨迹算法计算已确定了所需三个关键时间  $t_j, t_a, t_v$ , 但算法实现均采用按一定采样周期的计算机离散处理, 所以以上时间都必须圆整为采样周期的整数倍。但这种切换时间的圆整处理会产生圆整后的时间与实际计算的连续时间之间的偏差, 影响终点位置精度。本文提出了一种基于位置修正因子的补偿方法, 能有效地消除这种位置偏差, 保证精度精确地满足预期要求。

设时间  $t_j, t_a, t_v$  圆整后对应的圆整整数为  $n_j, n_a, n_v$ , 且加速度表已转化为内部整数加速度表, 由已推导的公式可知, 则圆整后的位移值  $s_{\text{round}}$  可计算为

$$s_{\text{round}} = a(n_j - 1)n_a n_v \quad (18)$$

位置修正因子可计算为

$$s_f = s / (S_f s_{\text{round}}) = s / [S_f a(n_j - 1)n_a n_v] \quad (19)$$

这里, 位移  $s$  为浮点数的国际单位, 而圆整后的位移值  $s_{\text{round}}$  为内部单位的整型值, 因此需将位移值  $s$  乘以位置当量的倒数以转化为具有相同单位的内部整型值。每个采样周期的轨迹数据通过该位置修正因子进行修正, 即可补偿离散实现时圆整所带来的误差, 精确地保证终点位置精度。

## 4 实例

为了验证所提出的算法及精度控制策略的有效性与可靠性, 本节对前面提出的算法及相关策略进行了计算, 并给出了相关的关键参数。设最大加加速度为  $j_{\text{max}}=1 \text{ 000 m/s}^3$ , 最大加速度为  $a_{\text{max}} = 6 \text{ m/s}^2$ , 最大速度为  $v_{\text{max}}=0.5 \text{ m/s}$ , 系统采样周期为  $t_s=0.4 \text{ ms}$ , 位置当量为  $0.25 \text{ nm}$ , 给定速度与终点运动位置见表, 表中也给出了每种情形下的加速度形状、位移修正因子及计算得到的终点位置(精度为以米为单位的小数点后 13 个有效位, 即万分之一纳米)。图 6~11 分别为表中各种情况所对应的轨迹曲线图, 其中  $v_0$  为指定运行速度,  $s_0$  为指定位置。比较给定的位置要求与对应的计算终点位置, 清楚地发现, 轨迹规划所生成的终点位置数据与给定值至少在万分之一纳米精度时完全吻合, 具有极高的精度。以上情况涵盖了三阶轨迹规划的所有情形, 具有可靠性。

表 速度、位置约束及关键参数

序号	速度 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	位移 $s/\text{mm}$	修正因子 $\eta$	终点位置 $x/\text{mm}$	加速度 形状
1	0.03	0.50	0.949 305 203 521 54	0.50	三角形
2	0.10	0.40	0.925 925 925 925 93	0.40	三角形
3	0.02	0.40	0.851 311 978 172 36	0.40	三角形
4	0.03	0.32	0.911 332 995 380 68	0.32	三角形
5	0.18	20.00	0.999 200 639 488 41	20.00	梯形
6	0.50	20.00	0.986 707 082 188 75	20.00	梯形

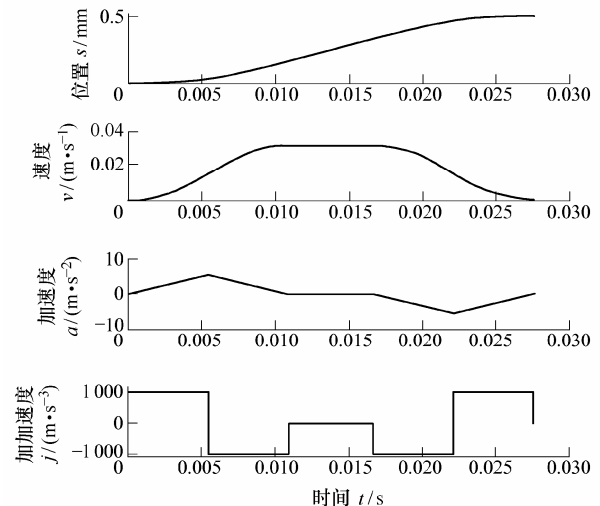


图 6  $v_0=0.03 \text{ m/s}, s_0=0.5 \text{ mm}$

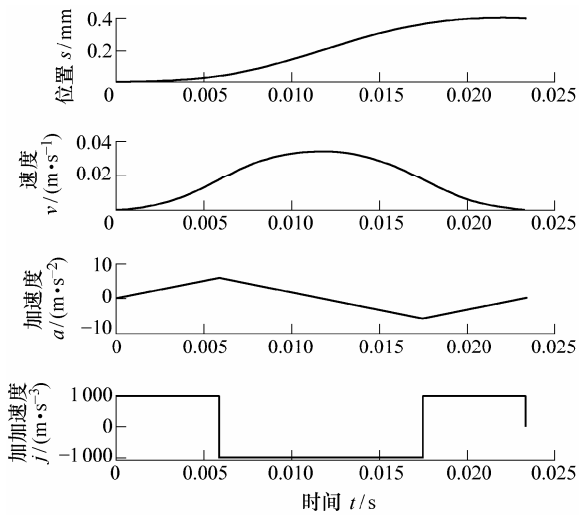


图 7  $v_0=0.10$  m/s,  $s_0=0.4$  mm

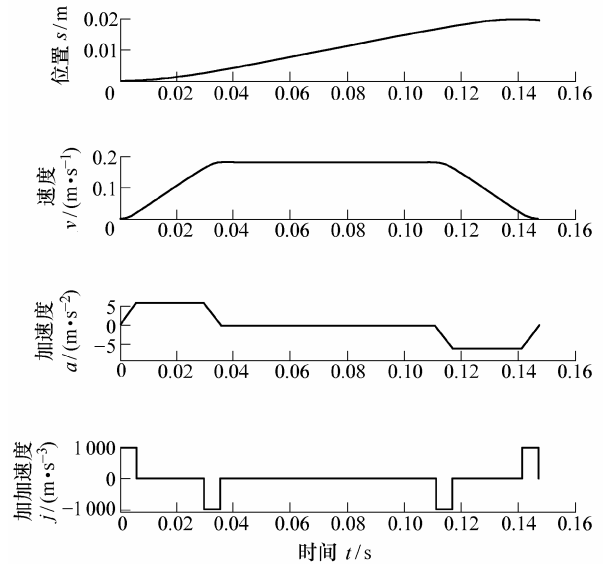


图 10  $v_0=0.18$  m/s,  $s_0=0.02$  m

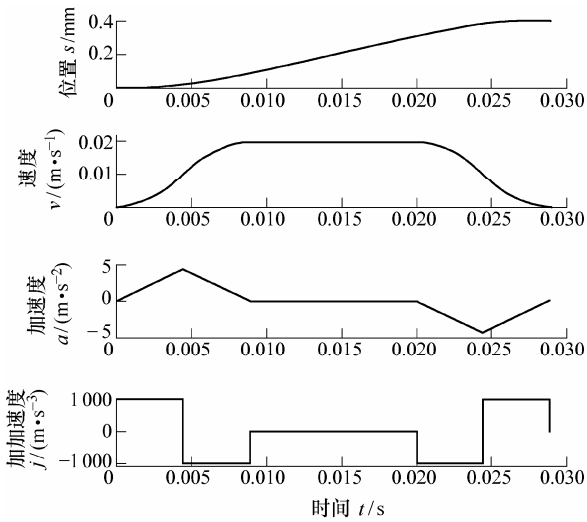


图 8  $v_0=0.02$  m/s,  $s_0=0.4$  mm

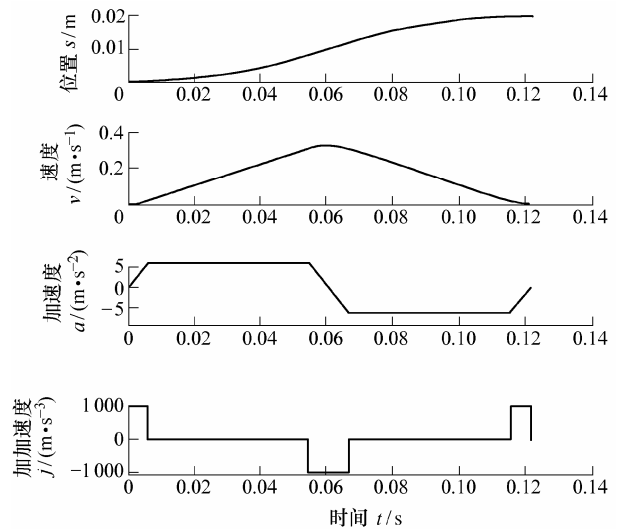


图 11  $v_0=0.5$  m/s,  $s_0=0.02$  m

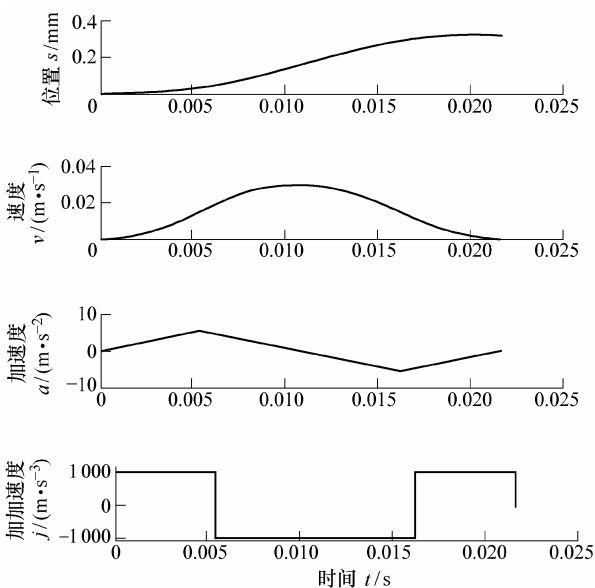


图 9  $v_0=0.03$  m/s,  $s_0=0.32$  mm

该算法结合反馈与前馈控制策略，采用超精密的激光测量系统，已在光刻机半导体加工装备的超精密运动控制系统研发中得到了实际应用，获得了良好的控制效果。在 120 mm/s 的运行速度下，具有约 10 nm 的超精密纳米级位置跟踪误差精度，其跟踪误差结果如图 12 所示。

## 5 结论

给出了一种三阶点对点轨迹规划的通用算法，该算法处理了实际应用中存在的各种情形，具有极强的灵活性和可靠性。该算法也考虑了算法离散实现过程中所带来的精度损失，提出了内部整数积分和位置修正因子补偿的精度控制策略，有效保证了轨迹计算的精度。实例证明了提出算法的有效性和精确性。该算法具有以下优点：时间优化，可靠，

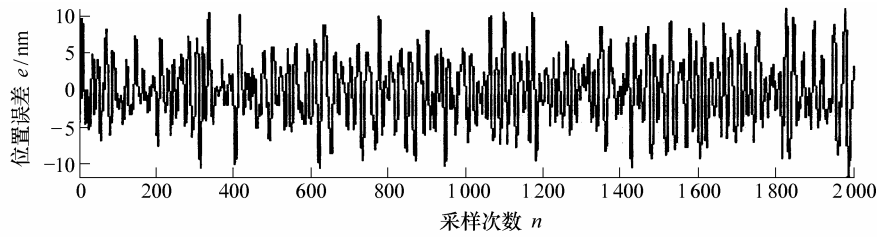


图 12 实际位置跟踪误差结果

易实现,高精度及通用性等,且易于推广到其他轨迹规划和更高阶的轨迹规划中,具有良好的应用前景。该算法已应用于具有纳米级加工精度的半导体加工设备研发中,取得了很好的效果。

### 参 考 文 献

- [1] LEWIN C. Motion control gets gradually better[J]. Machine Design, 1994, 66: 90-94.
- [2] MECKL P H, SEERING W P. Minimizing residual vibration for point-to-point motion[J]. Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design, 1985, 107: 378-382.
- [3] MECKL P H, ARESTIDES P B, WOODS M C. Optimized s-curve motion profiles for minimum residual vibration[C]//Proceedings of the American Control Conference, Philadelphia, Pennsylvania, 1998: 2 627-2 631.
- [4] ROOVER D, SPERLING F. Point-to-point control of a high accuracy positioning mechanism[C]//Proceedings of the American Control Conference, Albuquerque, New Mexico, 1997: 1 350-1 354.
- [5] DIJKSTRA B G, RAMBARATSINGH N J, SCHERER C, et al. Input design for optimal discrete-time point-to-point motion of an industrial XY positioning table[C]// Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control, Sydney, Australia, 2000: 901-906.
- [6] ZHOU L, MISAWA E A. Vibration suppression control profile generation with both acceleration and velocity constraints[C]//Proceedings of the American Control Conference, Portland, 2005: 4 736-4 741.

作者简介: 穆海华, 男, 1976 年出生, 博士研究生。主要研究方向为微电子装备超精密运动控制技术、CAD/CAM、数控技术。

E-mail: haihuamu@yahoo.com.cn