

利用 CNC 多维约束的 S 型速度规划

吴继春¹⁾, 许可¹⁾, 周会成²⁾, 范大鹏³⁾

¹⁾(湘潭大学机械工程与力学学院 湘潭 411105)

²⁾(华中科技大学国家数控系统工程技术研究中心 武汉 430074)

³⁾(国防科技大学智能科学学院 长沙 410073)

(wujichun@xtu.edu.cn)

摘 要: 经典控制模型中存在时间过耦合, 而速度规划与实时轨迹控制都与时间关联, 导致实时计算量、规划与控制协调性等不足的问题, 提出利用 CNC 多维约束的 S 型速度规划方法. 首先建立双重反馈的控制模型, 内反馈继承经典控制模型将时间反馈到控制器, 外反馈将非时间反馈到规划器; 然后将影响速度规划的因素分为时间相关与时间无关, 与时间相关因素在控制器中实时控制, 与时间无关因素在规划器中进行非时间速度规划; 在规划器中建立基于轨迹路径长度、轨迹几何特性、运动参数以及程序行号等信息的多维约束模型; 最后以路径长度代替时间作为运动参考量, 结合多维约束模型, 考虑轨迹的几何特性与路径长度映射关系, 使轨迹特性与非时间建立具有空间性关联. 通过 MATLAB 仿真对控制模型的抗干扰能力进行验证, 并通过 CODESYS 软件编程和实验的结果表明, 所提方法是可行和有效的.

关键词: 多维约束模型; 数控系统; S 型速度规划; 双重反馈控制模型

中图分类号: TP391.41 **DOI:** 10.3724/SP.J.1089.2023.19679

S-Type Velocity Planning Using CNC Multi-Dimensional Constraints

Wu Jichun¹⁾, Xu Ke¹⁾, Zhou Huicheng²⁾, and Fan Dapeng³⁾

¹⁾(School of Mechanical Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105)

²⁾(National NC System Engineering Research Center, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

³⁾(College of Intelligent Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract: There is time overcoupling in the classical control model, and both velocity planning and real-time trajectory control are related to time, which leads to the deficiency of real-time computation and coordination between planning and control. Firstly, a dual feedback control model is established. The internal feedback inherits the classical control model and feeds time back to the controller, while the external feedback feeds non-time back to the planner. Then the factors affecting the speed planning are divided into time dependent and time independent factors, time dependent factors are controlled in real time in the controller, and time independent factors are planned in the planner. A multi-dimensional constraint model based on path length, trajectory geometry, motion parameters and program line number is established in the planner. Finally, the path length is used as the reference of motion instead of time, and the mapping relationship between the path length and the geometric characteristics of the trajectory is considered in combination with the multidimensional constraint model, so that the trajectory characteristics are spatially correlated with

收稿日期: 2022-04-18; 修回日期: 2022-10-11. 基金项目: 国家区域创新发展联合基金(U19A2072); 湖南省自然科学基金(2021JJ30678). 吴继春(1979—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为数控技术、PLCOPEN 运动规范; 许可(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为数控技术、PLCOPEN 运动规范; 周会成(1974—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为数控系统开发、小线段插补及运动控制中可视化; 范大鹏(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为超精密测量、机床运动误差分析、运动控制、特种装备等.

non-time. The anti-interference ability of the control model is verified by MATLAB simulation, and the results of CODESYS software programming and experiments show that the proposed method is feasible and effective

Key words: multi-dimensional constraints; numerical control system; S-type velocity planning; dual feedback control model

速度规划一直是数控技术研究的重点,在数控高速加工中,为保证轨迹控制的效率和精度,避免发生冲击、失步、超程和振荡,需要进行加减速控制.由于 S 型加减速的加速度轨迹不存在突变,能够充分地发挥电机的性能并减少冲击,因此被广泛地应用和讨论^[1].目前,已有大量针对 S 型加减速的工作. Ni 等^[2]、田军锋等^[3]和潘海鸿等^[4]对 S 型加减速在数控系统中的应用进行验证,总结出可能出现的 8 种 S 型加减速方式,由于加减速过程中加加速度的不连续导致系统的柔性不足;吴继春等^[5]针对传统的 S 型加减速中加加速度的不连续,提出基于连续捷度的 S 型加减速方式和曲线段的分段策略,能够有效地增加加减速过程中的柔性.文献[6-8]将 S 型加减速应用于样条轨迹的插补中,提出插补曲线的分段策略,并提出快速速度规划策略,大大提高了机床的柔性加减速运动控制能力.

上述工作都是以时间为反馈量进行运动控制,需要把所有因素和时间建立关联,导致时间约束的过耦合;进一步,速度规划需要考虑轨迹路径长度、几何特性、外部干预、机床动态特性以及运动参数等诸多因素,其中,轨迹路径长度、几何特性等与时间无关,具有空间性,而外部干预、机床动态特性、运动参数与时间相关,具有时间性和突发性.如果速度规划考虑所有因素与时间相关,会引起实时轨迹控制时较大的计算量,同时,一旦外部干预或者速度修调,都可能引起速度规划失效.

因此,寻找一个新的且与时间无关的参考量是解决上述问题的关键.文献[9-12]提出基于事件的运动控制方法,通过选取合适的参考量,并通过 STR(state to reference)变换建立规划空间和运动状态空间的映射关系,提出基于事件的轨迹规划理论.陈宜滨等^[13]对基于事件的规划、控制系统的稳定性和能观能控性进行验证,利用反馈非线性化和非线性化微分几何理论证明了基于事件系统的稳定性和能观能控性,并以四轮差动小车为对象,验证了该参考量在时延系统中明显优于时间参考.

李杰等^[14]将路径作为参考量,设计基于路径参考的控制器,并以此对机器人进行轨迹跟踪控制,验证了该控制算法能够提高机器人在处理不确定事件的能力.王栋耀等^[15]选择基于实际路径 X 轴的投影为运动参考量,消除时间对控制系统的直接影响,提高系统的抗干扰能力.

针对时间控制系统的不足,本文建立双重反馈的控制模型,其中,内反馈继承经典控制模型将时间反馈到控制器,外反馈将非时间反馈到规划器.进一步,将影响速度规划的因素分为时间相关与时间无关,其中,时间相关因素考虑内反馈中实时轨迹控制;本文重点考虑与时间无关因素在外反馈规划器中进行非时间速度规划,以便控制器中与时间相关能更好地实时控制.每行的 G 代码中包含路径长度、几何特性、运动参数等信息,是一个含多维信息的参考量,与基于时间的控制器相比,其在复杂或不确定情况下的控制效果较好.本文基于双反馈控制模型,将提出的非时间速度规划应用于实际的轨迹规划中,完成非对称的 S 型加减速控制;针对传统 S 型速度规划算法计算复杂的问题,提出基于多维约束下的快速速度规划算法,并通过实例验证了该算法的有效性.通过 MATLAB 和 CODESYS 软件对本文方法进行实验,验证了该方法在数控系统中的有效性.

1 双重反馈控制模型

目前,基于时间参考量的定常系统的研究和应用已经十分成熟,控制系统对运动的描述通常是基于时间 t 的函数,即速度规划被描述为时间的函数,控制模型如图 1 所示.规划者根据规划向系统提供输入,但速度规划中由于没有考虑到突发事件,当遇到系统故障或者外部干扰时,用户需要重新进行规划或者执行应急计划.然而,对于一些在非常复杂的环境中工作的高速系统(如机器人等系统)几乎不可能实时重新规划运动;此外,除突发事件外还有累积的事件,如系统误差会随着时

间累积,在低于阈值时系统无法检测并处理,直至超过阈值时才会进行相应的处理,可能导致系统控制精度的降低.因此,需要设计一种能够检测突发和累积事件,并能够迅速调整或使原来规划继续有效的控制方法,建立非时间速度规划,使所有的突发事件不与时间关联,使突发事件发生具有空间性.

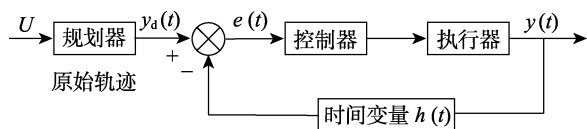


图1 经典的控制模型

1.1 双重反馈控制模型建立

本文提出双重反馈控制模型:内反馈继承经典控制模型,用于轨迹的实时控制;外反馈通过非时间反馈在规划器中建立非时间速度规划.在规划器中建立非时间速度规划,一方面,外界干预、轨迹特性等与非时间建立关联,使非时间速度规划具有空间性;另一方面,非时间运动规划的相关计算由于不需要很强的实时性,可以从经典速度规划与轨迹控制耦合中解耦,减轻实时轨迹控制计算量.以G代码指令为例,每行G代码包含该段加工轨迹的路径长度、指令速度等关键参数.令第 n 行的指令参数的集合为 G_n ,其元素包括 S_n , κ_n 和 M ,其中, S_n 为该指令实际执行的轨迹路径长度,组成元素为 s , κ_n 为几何特性,如曲率等; $M_n=M_n(u,a,v)$ 为运动参数集合,其中, u 为加速度, a 为加速度, v 为速度.因此, $G_n(S_n, M_n, \kappa_n)$ 是一个包含多维约束信息的集合,在 G_n 中 s 为非时间因素,非时间反馈具体为 s 反馈,所有的外部干预、轨迹几何特性都与 s 建立关联,从而使其具有空间性,不会随时间变化而改变.

如图2所示,系统输出 $y(t)$ 经过反馈环节 H_2 反馈至规划器,由于不需要进行偏差比较,只需进行非时间速度规划,因此外反馈不需要进行正负反馈.规划器中基于路径长度 s 进行非时间的速度规划,其输出为非时间速度规划,也是控制器的输入.控制器中为基于时间 t 的实时轨迹控制,系统的输出通过 H_1 负反馈与 $y_d(G_n)$ 比较生成误差 $e(G_n)$,从而形成闭环控制.控制器中为基于时间 t 的实时轨迹控制,输出为插补信息,即系统输出 $y(t)$.

设内反馈的传递函数 $G_1(s)$ 为

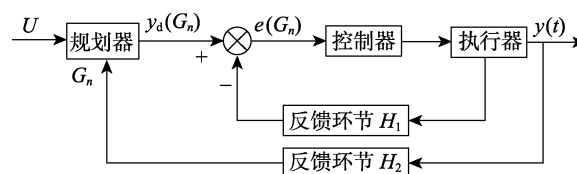


图2 基于双重反馈控制模型

$$G_1(s) = \frac{K}{Ts^2 + s + K} \quad (1)$$

K 是比例系数, T 是振荡环节二阶项系数, 阻尼比

$$\xi_1 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{KT}}, \text{ 稳态误差 } e_{ss1} = 1.$$

非时间参考反馈位移 l 的拉氏变换是 $\frac{ds}{dt} \geq 0$,

为了使系统外反馈传递函数具有良好性能,在反馈环节串联 $K_p s$ 微分环节,外反馈传递函数为

$$G_2(s) = \left(\frac{K}{Ts^2 + s + K} \right) / \left(1 - \frac{l}{s} K_p s \frac{K}{Ts^2 + s + K} \right) = \frac{K}{Ts^2 + s + (1 - K_p l)K} \quad (2)$$

阻尼比 $\xi_2 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{KT(1 - K_p l)}}$, 稳态误差 $e_{ss2} =$

$(1 - K_p l)$, $0 < (1 - K_p l) < 1$, 因此有 $\xi_2 > \xi_1$, 增大阻尼比可以减弱系统的振荡性能,即降低超调量,减少震荡次数.同时, $e_{ss2} < e_{ss1}$, 则表明稳态误差减少,跟随精度有提高.

1.2 双重反馈控制系统的稳定性分析

由于双重反馈控制模型是在“基于时间 t ”的控制模型上引入外反馈,因此,可以在时间反馈的经典控制模型基础上对双重反馈模型系统的稳定性进行分析.假设 $G_n(S_n, M_n, \kappa_n)$ 与 t 的关系存在,且 $G_n = f(t)$.对于简单时间系统,其稳定性可以通过选择合适的Lyapunov函数 $V(x)$ 判断.假设系统是稳定的,则系统满足以下条件:

(1) $V(x(t)) > 0$, 即 $V(x)$ 正定;

(2) $dV(x)/dt < 0$, 即 $\dot{V}(x)$ 负定.

其中, $x(t)$ 是系统状态, $V(x(t))$ 为Lyapunov函数.

当 G_n 与时间 t 保持相同的单调性时, $V(x(t))$ 与 $V(x(G_n))$ 性质相同.虽然在多维约束模型中各参数与时间之间的函数关系不同,但各插补点之间的路径长度 s 是直接参与运动轨迹相关的参考量,因此只需考虑 s 与 t 的单调性即可,即 $V(x(G_n))$ 与

$V(x(s))$ 具有相同的性质, 则

$$\frac{dV(x(t))}{dt} = \frac{dV(x(G_n))}{dt} = \frac{dV(x(s))}{ds} \frac{ds}{dt} \quad (3)$$

由于 s 是 t 的严格递增函数, 因此 $\frac{ds}{dt} \geq 0$, 则

可得 $\frac{dV(x(s))}{ds} < 0$, 即 $\frac{dV(x(s))}{ds}$ 负定, $\dot{V}(x(G_n))$ 负定. 所以, 可以判断双重反馈模型的系统是稳定的.

2 基于多维约束模型的速度规划

2.1 基于多维约束下的速度规划

传统的数控系统是基于 t 的经典控制模型, 对于控制器而言, 期望的轨迹是时间的函数. 双重反馈模型下, 外反馈将系统的输出反馈至规划器进行运动规划, 外反馈值是一个包含多个参数信息的集合体. 因此, 本文在双重反馈模型的框架下提出基于多维约束 G_n 的速度规划, 其中, 路径长度 s 作为实际运动的参考量. 基于多维约束 G_n 的速度规划是结合多维约束模型, 考虑加工代码行号 n 、轨迹的几何特性 κ_n 、最大的运动参数约束 M_n 等与 s 映射关系的一种与时间无关的规划方法. 设定 $w = v^2$, 将 w 对 s 求微分, 则可以得到基于 s 的运动表达式

$$\begin{cases} \frac{dw}{ds} = 2a, & -w_{\max} \leq w \leq w_{\max}, & -a_{\max} \leq a \leq a_{\max} \\ \frac{da}{ds} = u, & -u_{\max} \leq u \leq u_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $w_{\max} = v_{\max}^2$ 为最大速度约束, $a_{\max}$ 和 $u_{\max}$ 分别为最大加速度和最大加加速度.

由式(4)可知, 基于多维约束 $G_n(S_n, M_n, \kappa_n)$ 的运动模型是状态和输入约束的二阶模型, 因此, 基于多维约束的速度规划就是求在运动学和动力学约束下各运动量与 s 的函数 $G_n(S_n(s), M_n(s), \kappa_n(s))$. 其中, $M_n(u(s), a(s), v(s))$ 为实时运动参数; $u(s)$, $a(s)$ 和 $v(s)$ 分别为实时加加速度、加速度和速度大小, 其阈值通过输入参数约束.

2.2 非时间位移引导的 S 型速度规划

根据多维约束参考下的运动模型可知, 在给定的初始和终止条件下, 得到的规划轨迹是不唯一的, 使用不同的优化模型会得到不同的优化方案. 基于此, 本文使用时间最优计划. 令 $x_1 = w$,

$$x_2 = a, X = [x_1, x_2], F = \begin{bmatrix} 0 & 2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, X' = \frac{dX}{ds},$$

计算该模型的状态空间表达式为

$$X' = FX + Bu \quad (5)$$

给定边界条件之后, 状态方程的解显然不唯一, 使用时间最优方案求解式(5). 将轨迹规划问题转变为基于路径的时间优化问题, 可以得到

$$\min_u J = \min_u \int_{s_0}^{s_e} \frac{1}{\sqrt{w}} ds = \min_u \int_{s_0}^{s_e} \frac{1}{\sqrt{x_1}} ds \quad (6)$$

其中, s_0 和 s_e 表示始末点所处的位置; s_i 表示各个加减速点代表的路径长度, 边界条件为 $X(s_0) = 0, X(s_e) = 0$. 使用庞德里亚金原理求解时间优化问题, 可得 $u(s)$ 表达式为

$$u(s) = \begin{cases} u_{\max}, & s_0 < s \leq s_1 \\ 0, & s_1 < s \leq s_2 \\ -u_{\max}, & s_2 < s \leq s_3 \\ 0, & s_3 < s \leq s_4 \\ -u_{\max}, & s_4 < s \leq s_5 \\ 0, & s_5 < s \leq s_6 \\ u_{\max}, & s_6 < s \leq s_7 \end{cases} \quad (7)$$

给定约束条件 $a_{\max}$ 和 $v_{\max}$, 已经始末速度大小 v_s 和 v_e , 将 $u(s)$ 表达式进一步对 s 积分, 可得加速度和速度表达式为

$$a(s) = \begin{cases} u_{\max}(s-s_0), & s_0 < s \leq s_1 \\ a_{\max}, & s_1 < s \leq s_2 \\ a_{\max} - u_{\max}(s-s_2), & s_2 < s \leq s_3 \\ 0, & s_3 < s \leq s_4 \\ -u_{\max}(s-s_4), & s_4 < s \leq s_5 \\ -a_{\max}, & s_5 < s \leq s_6 \\ -a_{\max} + u_{\max}(s-s_6), & s_6 < s \leq s_7 \end{cases} \quad (8)$$

$$v(s) =$$

$$\begin{cases} \sqrt{v_s^2 + u_{\max}(s-s_0)^2}, & s_0 < s \leq s_1 \\ \sqrt{v_s^2 + u_{\max}(s_1-s_0)^2 + 2a_{\max}(s-s_1)}, & s_1 < s \leq s_2 \\ \sqrt{v_{\max}^2 + u_{\max}(s-s_3)^2}, & s_2 < s \leq s_3 \\ v_{\max}, & s_3 < s \leq s_4 \\ \sqrt{v_{\max}^2 + u_{\max}(s-s_4)^2}, & s_4 < s \leq s_5 \\ \sqrt{v_{\max}^2 + u_{\max}(s_6-s_5)^2 + 2a_{\max}(s-s_5)}, & s_5 < s \leq s_6 \\ \sqrt{v_e^2 + u_{\max}(s-s_7)^2}, & s_6 < s \leq s_7 \end{cases} \quad (9)$$

其中,

$$\begin{cases} s_1 = s_0 + \frac{a_{\max}}{u_{\max}} \\ s_2 = s_0 + \frac{w_{\max} - w_s}{2a_{\max}} \\ s_3 = s_0 + \frac{w_{\max} - w_s}{2a_{\max}} + \frac{a_{\max}}{u_{\max}} \\ s_4 = s_7 + \frac{w_{\max} - w_s}{2a_{\max}} + \frac{a_{\max}}{u_{\max}} \\ s_5 = s_7 + \frac{w_{\max} - w_s}{2a_{\max}} \\ s_6 = s_7 - \frac{a_{\max}}{u_{\max}} \end{cases} \quad (10)$$

式(7)~式(10)中, S 型加减速的整个过程通过运动参数阈值 $u_{\max}$, $a_{\max}$ 和 $v_{\max}$ 确定. 当初速度大小 v_s 与末速度大小 v_e 不同时, S 型加减速过程是不对称的, 在实际的加工中, 为了减少启停并降低电机负载, 通常会设计不同的始末速度. 为了验证上述算法的规划效果, 将该算法与基于时间 t 的 S 型速度规划轨迹对比, 参数设置如下: 起点坐标为 $P_1(10,0)$, 终点坐标为 $P_2(15,0)$, $u_{\max} = 180 \text{ mm/s}^3$, $a_{\max} = 10 \text{ mm/s}^2$, $v_{\max} = 5 \text{ mm/s}$, $v_s = 0 \text{ mm/s}$, $v_e = 1 \text{ mm/s}$. 规划结果如图 3 所示. 对比图 3a, 图 3b 可以看出, 基于 s 的速度曲线也是连续的且成凸状, 基于时间的速度曲线则与之相反; 对比图 3c, 图 3d 可以看出, 虽然在运动过程中 2 种规划的位移曲线不同, 但都能达到目标位置. 因此, 仿真结果证明上述规划具有可行性.

3 基于非时间位移引导的快速速度规划

在基于多维约束模型的 S 型加减速中, 运动轨迹受到 s , $u_{\max}$, $a_{\max}$, $v_{\max}$ 等约束, 且不同的约束条件和初始条件会得到不同的运动轨迹. 将这些轨迹类型分为 17 种, 且任一运动轨迹都属于其中一种.

根据 S 型加减速轨迹的特点, 是否存在匀速段取决于 s , 是否存在加速段或者减速段则取决于 $v_{\max}$; 加速或者减速过程中是否能达到最大加速度或减速度, 取决于给定的 $v_{\max}$ 和 $a_{\max}$. 基于此, 将给定的约束条件代入式(9), 即可快速地判断是否存在各加减速点. 设加减速点之间的路径长度为

$$S_j = s_i - s_{i-1}, \quad j=1,2,3,\dots,7, \quad i=1,2,3,\dots,7 \quad (11)$$

在基于多维约束模型的速度规划中, 不同的约束条件对应不同的速度轨迹, 各段的轨迹模式

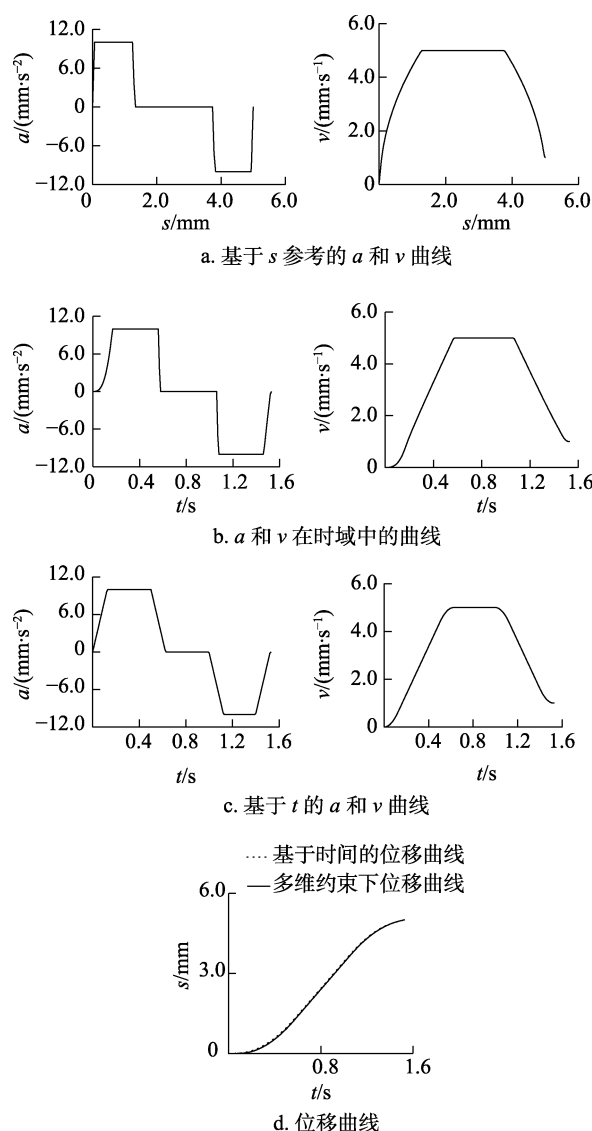


图3 基于不同参考量下的 a 与 v 曲线

和速度类型判断流程如图 4 所示. 设 S_a , S_v 和 S_d 分别为加速段、匀速段和减速段的路径长度, 若 $v_s > v_e$, 则加速段的路径长度小于减速段的路径长度; 否则, 加速段的路径长度大于减速段的路径长度. 为减少计算时间需要判断各段的具体情形, 各段的总路径长度为

$$\begin{cases} S = S_a + S_v + S_d \\ S_a = S_1 + S_2 + S_3 \\ S_v = S_4 \\ S_d = S_5 + S_6 + S_7 \end{cases} \quad (12)$$

设 $S' = S_a + S_d$, 将 S' 与 S 进行比较, 可以将 17 种速度规划分为 3 种类型: $S > S'$, $S \leq S'$ 和整个运动过程匀速. 分别对各情形进行讨论.

第 1 类. 如果 $S > S'$, 那么加速段和减速速度的

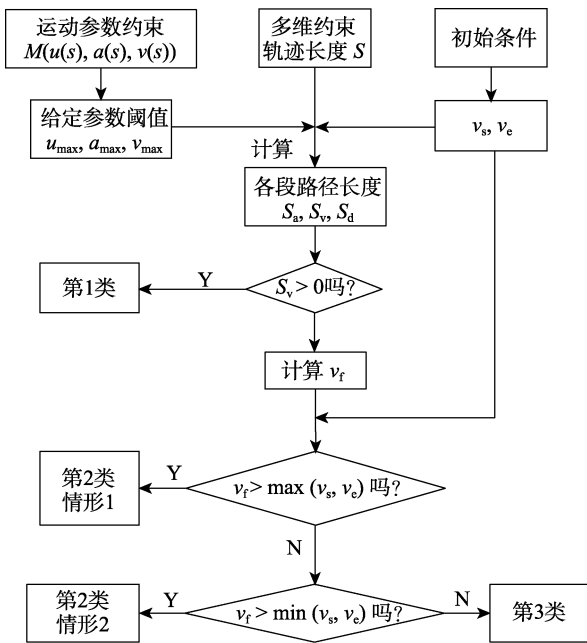


图 4 速度模式判断

路径长度之和小于总路径长度, 即 $S_v > 0$. 此时含有匀速段, 且可以达到给定的最大速度, 该情形可以分为 8 种类型. 进一步对是否最大加速度和最大减速度进行讨论.

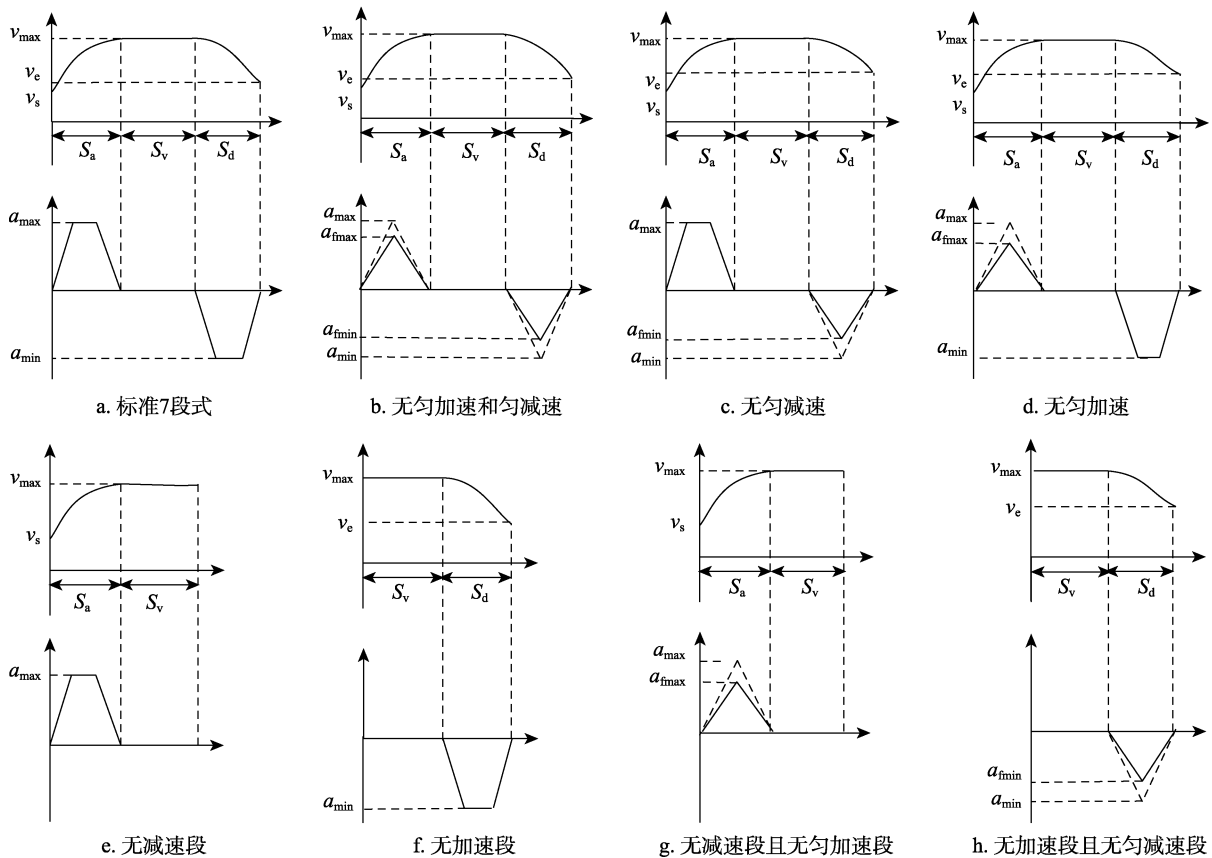


图 5 第 1 类速度模式

(1) 若 $\frac{w_{\max} - w_s}{2} \cdot u_{\max} \geq a_{\max}$, 则存在匀加速

段, 且 $S_{a1} = \frac{a_{\max}}{u_{\max}}$, $S_a = S_{a1} + \frac{w_{\max} - w_s}{a_{\max}}$, 其中, S_{a1} 为加加速度阶段路径长度.

(2) 若 $\frac{w_{\max} - w_s}{2} \cdot u_{\max} < a_{\max}$, 则不存在匀加速

段, 且 $S_{a1} = \sqrt{\frac{w_{\max} - w_s}{2u_{\max}}}$, $S_a = 2 \cdot S_{a1}$.

(3) 若 $\frac{w_{\max} - w_e}{2} \cdot u_{\max} \geq a_{\max}$, 则存在匀减速

段, 且 $S_{d1} = \frac{a_{\max}}{u_{\max}}$, $S_d = S_{d1} + \frac{w_{\max} - w_e}{2a_{\max}}$, 其中, S_{d1} 为减速度阶段的路径长度.

(4) 若 $\frac{w_{\max} - w_e}{2} \cdot u_{\max} < a_{\max}$, 则不存在匀减

速段, 且 $S_{d1} = \sqrt{\frac{w_{\max} - w_e}{2u_{\max}}}$, $S_d = 2 \cdot S_{d1}$.

上述情况进行组合可得 8 种速度曲线, 将上述加速度和速度曲线分为 2 类: 一是存在加减速段和匀速段, 如图 5a~图 5d 所示; 二是加速段不同时存在, 如图 5e~图 5h 所示.

第2类. 如果 $S < S'$, 那么 $S_v < 0$, 即实际速度不能到达最大值, 关键是确定运行过程中的最大速度或者加速度. 将这类速度类型分为2种情形:

情形1. 只有加速段或减速段.

(1) $w_s < w_e$, 且满足条件 $\frac{w_{\max} - w_s}{2} \cdot u_{\max} < a_{\max}$,

不存在匀加速段, 如图6a所示.

(2) $w_s < w_e$, 且满足条件 $\frac{w_{\max} - w_s}{2} \cdot u_{\max} \geq a_{\max}$,

存在匀加速段, 如图6b所示.

(3) $w_s \geq w_e$, 且满足条件 $\frac{w_{\max} - w_s}{2} \cdot u_{\max} < a_{\max}$,

存在匀减速段, 如图6c所示.

(4) $w_s \geq w_e$, 且满足条件 $\frac{w_{\max} - w_e}{2} \cdot u_{\max} \geq a_{\max}$,

存在匀减速段, 如图6d所示.

情形2. $S_a > 0$, $S_d > 0$, 同时存在加速段和减速段; 该类型中存在不能达到最大加速度和最大速度的情况, 即实际的最大速度和最大加速度的

值是未知的. 因此, 本文使用二分法近似求解实际的最大速度, 步骤如下:

Step1. 假设实际能够达到的最大速度为 $v_{f\max}$,

$$v_{f\max} = \frac{v_s + v_e}{2}.$$

Step2. 利用式(12)计算 S_a 和 S_d .

Step3. 如果 $S_a + S_d - S > \varepsilon$, 则不合要求, 令

$$\begin{cases} v_e = v_{f\max} \\ v_{f\max} = \frac{v_s + v_{f\max}}{2} \end{cases},$$

重复 Step2; 如果 $S_a + S_d - S < -\varepsilon$, 则不合要求, 令

$$\begin{cases} v_s = v_{f\max} \\ v_{f\max} = \frac{v_e + v_{f\max}}{2} \end{cases},$$

重复 Step2.

Step4. 如果 $|S_a + S_d - S| < \varepsilon$, 符合要求, 此时 $v_{\max} = v_{f\max}$, 执行下一步.

Step5. 利用式(10)求出 s_i , 通过式(8)(9)求得各段的加速度和速度曲线, 该类型的加速度和速度曲线如图7所示.

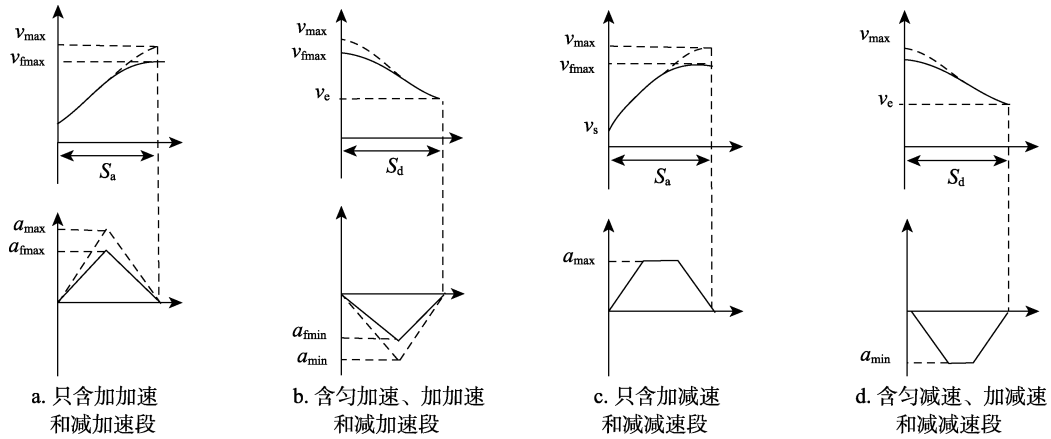


图6 第2类情形1速度模式

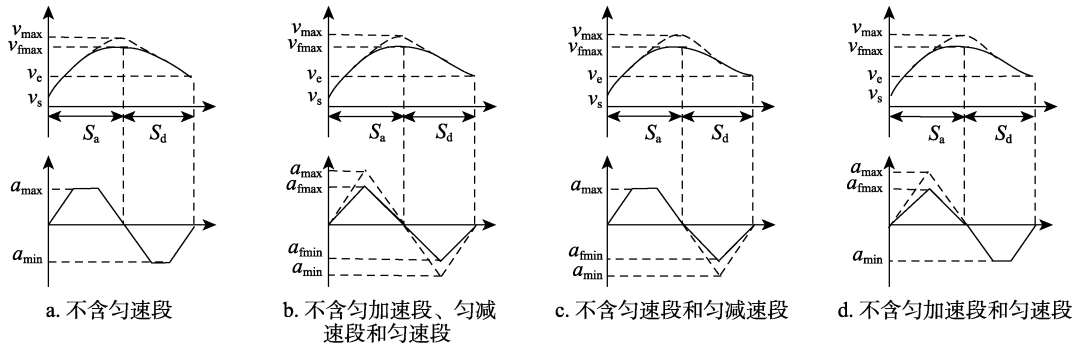


图7 第2类情形2速度模式

第3类. 匀速运动, 即初始速度和末速度与给定的最大速度约束大小相同, 全过程为匀速.

图5~图7中, $a_{f\max}$, $a_{f\min}$ 为实际运动过程能够

到达的最大加速度和最小加速度; 基于 S 型加减速的特性重新推导公式, 简化了算法的计算, 给定关键参数之后可以快速规划出各项参数指标. 传

统的 S 型加速度和速度表达式涉及多次乘法和加法, 当系统达不到规划值, 如实际速度达不到期望的最大速度时, 则在重新求解实际最大速度时延长了算法的计算时间. 但是, 利用简化的公式可以快速判断实际 S 曲线存在几个阶段, 能够减少系统计算所需资源, 从而提高加工效率和质量.

4 仿真和实验

4.1 双重反馈控制系统的稳定性实验

为了验证本文提出的双重反馈控制模型的控制效果, 对圆弧轨迹进行跟踪, 其中, 圆弧半径 $r = 2 \text{ mm}$, 线速度 $v = 2 \text{ mm/s}$, 角速度 $w = 1 \text{ rad/s}$. 图 8 所示为不同参考下的圆弧跟踪曲线, 初始时刻以圆心为起点, 运动开始后轨迹误差逐渐减少, 在 2 种控制模型下当运动至点 $P(10,0)$ 附近时, 跟踪误差接近于 0. 可以看出, 双重反馈模型轨迹跟踪能够较好地跟踪输入轨迹, 在轨迹控制上是可行的.

验证双重反馈模型在 CNC 系统中的控制效果. 以三叉戟轨迹为对象进行规划和仿真, 该类加工轨

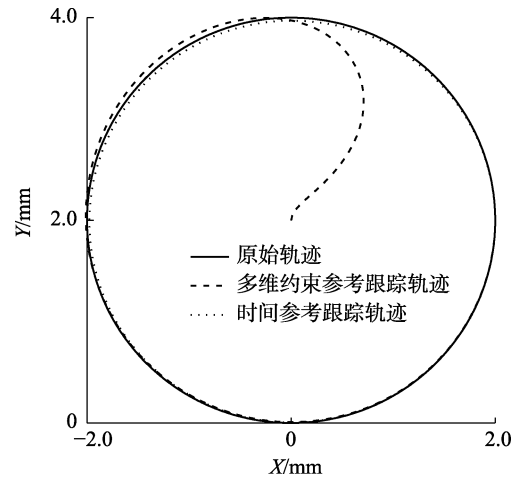


图 8 基于双重反馈和时间反馈的圆弧曲线跟踪

迹由 6 条直线段组成. 轨迹参数如下: 各段的起始点和终点坐标分别为 $A(10,0)$, $B(20,20)$, $C(12,8)$, $D(10,20)$, $E(8,8)$, $F(0,20)$, $A(10,0)$, $J = 2.8 \times 10^4 \text{ mm}^3/\text{s}^3$, $a_{\max} = 400 \text{ mm/s}^2$, $v_{\max} = 30 \text{ mm/s}$, $v_s = 0 \text{ mm/s}$, $v_e = 0 \text{ mm/s}$. 图 9a 所示为以 G_n 为参考量得到规划曲线, 将横坐标转换为时间, 并与基于时间参考得出的规划进行对比, 结果如图 9b 所示.

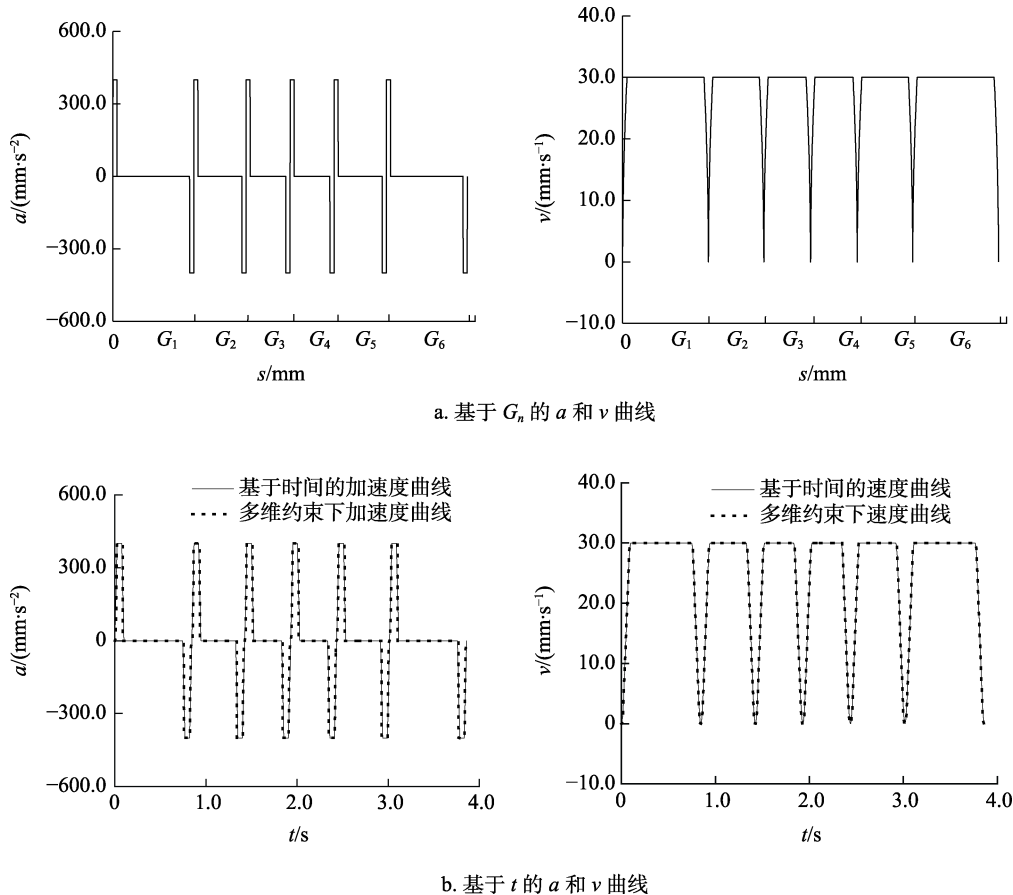


图 9 基于不同参考下的三叉戟曲线速度规划

从图9可以看出,基于非时间规划的加速度和速度曲线是标准S型曲线,与基于时间规划的加速度和速度曲线偏差较小.利用CODESYS软件对上述三叉戟轨迹进行仿真测试,分别将基于多维约束的速度规划和时间反馈的速度规划在CODESYS平台进行插补轨迹,插补轨迹如图10b所示,可以看出,两者位移偏差较小,最终轨迹几乎一致,但是实际效果仍需实验验证.

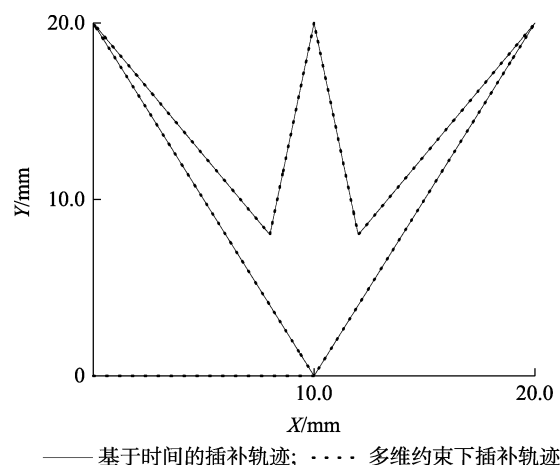


图10 三叉戟插补轨迹

4.2 多维约束非时间速度规划算法实现验证

如图11所示,实验平台由上位机及编程软件、主站、从站、实时以太网总线、驱动器和电机组成,实时以太网采用高性能NCUC 2.0总线协议,通信周期为1ms.编程软件和HMI监控软件运行在上位机上,与主站进行TCP/IP通信,完成控制程序代码下载和实时数据交互;主站模块是系统逻辑程序执行和任务调度的核心;从站是系统的主体,直接完成对外围设备的控制,主要与主站进行实时通信,实现数模数据采集和输出、电机伺服等实时控制功能.数字交流伺服驱动是一种高性能、智能化、高可靠性、体积小的高端交流伺服系统,采用专用数字信号处理器(digital signal processor, DSP)、智能功率模块(intelligent power module, IPM)和先进优化的控制算法,实现转矩、转速和位置的精确数字控制.

4.2.1 抗干扰测试

通过实验验证本文提出的双重反馈模型下的多维约束速度规划方法在遇到突发事件时的规划能力.参数设置如下:目标路径长度 $S=1.2\text{ m}$,速度 $v=0.1\text{ m/s}$.从图12可以看出,在 $t=3\text{ s}$ 左右对电机施加干扰,电机停止运动,在 $t=7\text{ s}$ 左右去除干扰后电机继续运行,直至终点.实验结果表明,

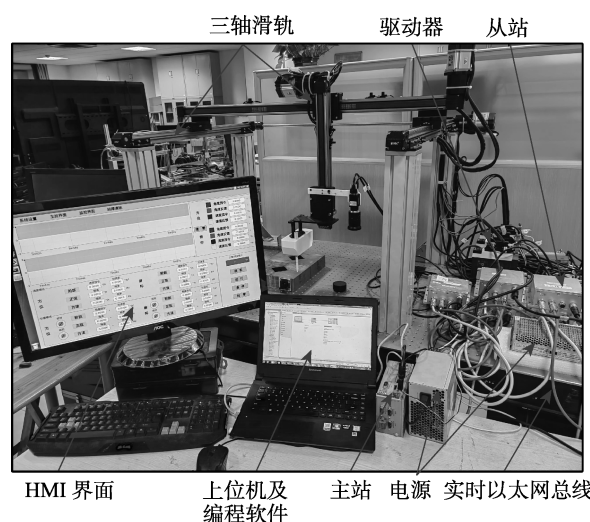
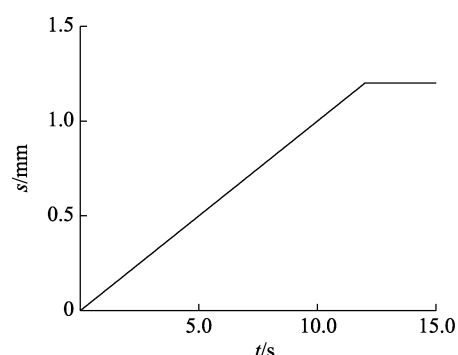
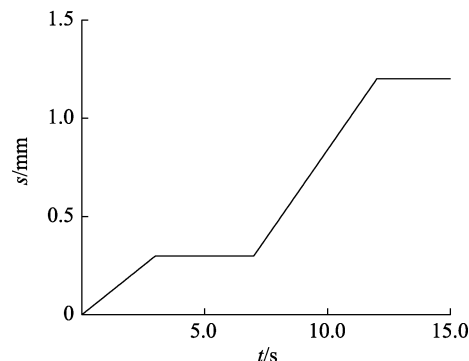


图11 实验平台架构



a. 电机自由运动下的轨迹



b. 电机遇障碍时的轨迹

图12 双重反馈控制下的运动曲线

该方法能够对干扰做出反应并及时调整规划.

4.2.2 插补实验

验证基于多维约束的速度规划在实际工程中的应用.本文以如图13所示火车轮对的镟修轨迹为实验对象,进行插补测试.参数配置如下:为了符合实际需要,减少电机的启停,设计了非对称式的S型速度规划,通过各段的曲率,可得到各段运动参数阈值 $J=1.6\times 10^4\text{ mm/s}^3$, $a_{\max}=200\text{ mm/s}^2$, $v_{\max}=20\text{ mm/s}$, $v_s=0\text{ mm/s}$, $v_{s1}=2\text{ mm/s}$, $v_{s2}=4\text{ mm/s}$,

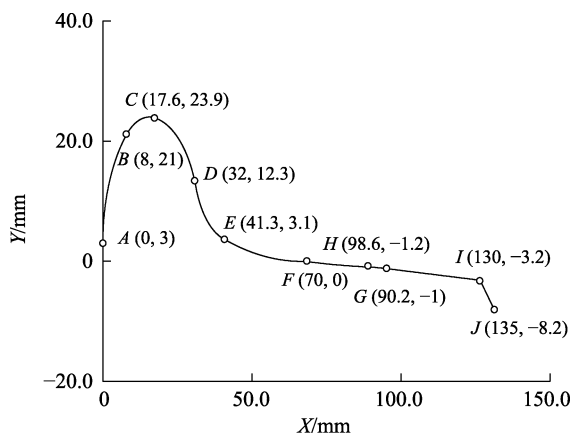


图 13 火车轮对镟修轨迹

$v_{s3}=3\text{ mm/s}$, $v_{s4}=5\text{ mm/s}$, $v_{s5}=4\text{ mm/s}$, $v_{s6}=3\text{ mm/s}$, $v_{s7}=2\text{ mm/s}$, $v_{s8}=2\text{ mm/s}$, $v_e=0\text{ mm/s}$. 利用本文的速度规划方法和传统时间参考下速度规划算法, 得到该基于多维约束下和时间参考下的实际运动加速度及速度曲线, 如图 14 所示.

从图 14 可以看出, 2 种参考下的加速度和速度曲线不同, 但在相同时间内的规划效果一致. 基于双重反馈控制系统也能够完成对轨迹的插补, 插补结果如图 15 所示. 可以看出两者的实时插补轨迹几乎一致, 表明基于双重反馈下的多维约束轨迹规划算法是可行的.

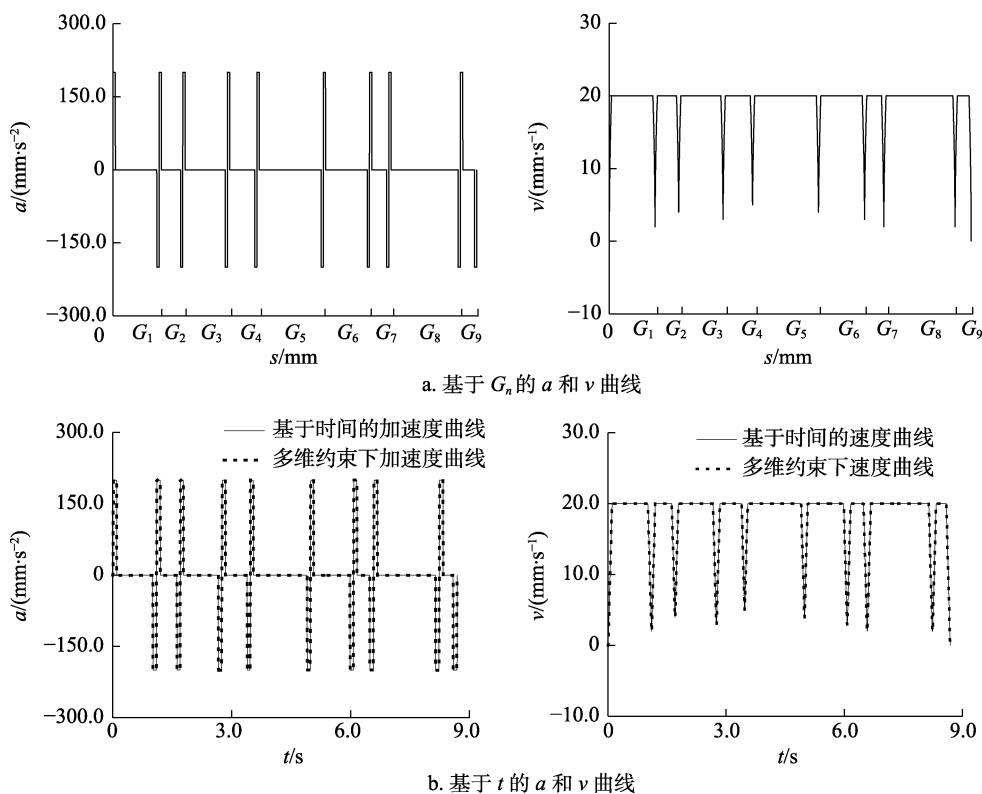


图 14 基于不同参考下的速度与加速度曲线

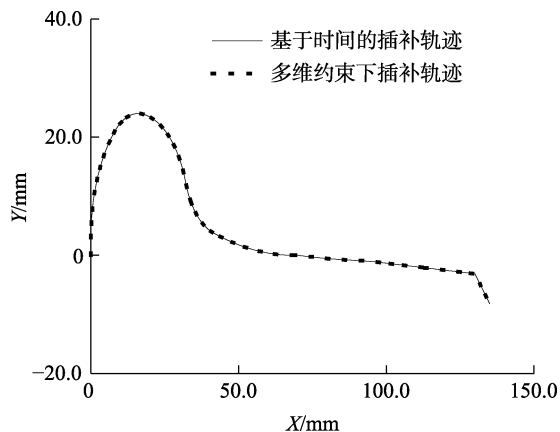


图 15 镟轮机轨迹实时插补轨迹

从图 16 可以看出, 电机空载时 2 条插补轨迹误差小于 0.05 mm , 即基于双重反馈模型在数控系统中可以获得与基于时间参考相同的控制效果, 但其不受时间的约束, 在系统无输出时规划器会自动停止规划, 避免了误差随时间累加, 使得系统能够应对离散或者连续的突发事件而不用重新规划. 因此, 双重反馈控制模型具有现实意义.

5 结 语

本文提出利用 CNC 多维约束的 S 型速度规划

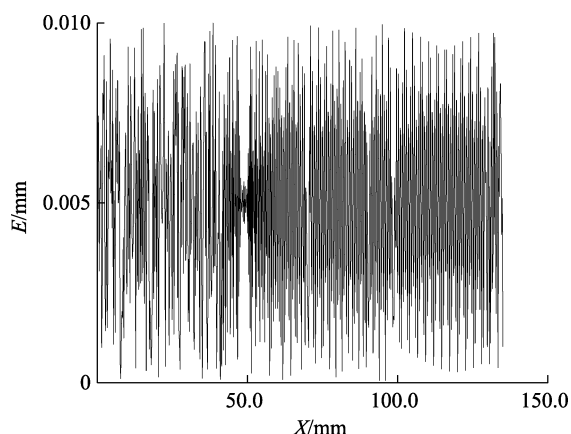


图16 2条轨迹之间误差曲线

方法. 首先建立双重反馈的控制模型, 内反馈继承经典控制模型将时间反馈到控制器, 外反馈将非时间反馈到规划器; 然后设计基于多维约束的控制模型, 使用新的运动参考取代时间对系统的控制, 并充分利用数控指令中的参数信息, 是一个含多维控制信息的参考量, 与基于时间的一维控制器相比, 其在复杂或不确定情况下的控制效果较好. 对三叉戟曲线和铰轮机轨迹进行基于多维约束的速度规划, 并进行插补仿真和实验, 结果表明, 本文方法可实现对曲线的插补, 验证了基于多维约束的运动模型在数控系统上的有效性.

参考文献(References):

- [1] Yuan L, Zeng S S, Chen Z B. Simultaneous prediction of surface topography and surface location error in milling[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2015, 229(10): 1805-1829
- [2] Ni H P, Zhang C R, Chen Q Z, *et al.* A novel time-rounding-up-based feedrate scheduling method based on S-shaped ACC/DEC algorithm[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(5): 2073-2088
- [3] Tian Junfeng, Lin Hu, Yao Zhuang, *et al.* Study on S-shape curve acceleration and deceleration control fast planning on CNC system[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2013, 34(1): 168-172(in Chinese)556
(田军锋, 林浒, 姚壮, 等. 数控系统 S 型曲线加减速快速规划研究[J]. 小型微型计算机系统, 2013, 34(1): 168-172)
- [4] Pan 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): 190-195(in Chinese)
(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): 190-195)
- [5] Wu Jichun, Zhou Huicheng, Tang Xiaoqi, *et al.* Research on a feed-rate planning algorithm for continuous jerk[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(13): 1584-1587(in Chinese)
(吴继春, 周会成, 唐小琦, 等. 基于连续捷度的进给速度规划算法研究[J]. 中国机械工程, 2011, 22(13): 1584-1587)
- [6] Lee A C, Lin M T, Pan Y, *et al.* The feedrate scheduling of NURBS interpolator for CNC machine tools[J]. CAD Computer-Aided Design, 2011, 43(6): 612-628
- [7] Du X, Huang J, Zhu L M. A complete S-shape feed rate scheduling approach for NURBS interpolator[J]. Journal of Computational Design and Engineering, 2015, 2(4): 206-217
- [8] Yang Min, Zhao Xianchao, Zhong Zeshan, *et al.* Adaptive velocity planning under complex constraints for 5-axis CNC systems[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(11): 161-171(in Chinese)
(杨敏, 赵现朝, 钟泽杉, 等. 复杂约束下的五轴数控系统自适应速度规划[J]. 机械工程学报, 2020, 56(11): 161-171)
- [9] Xi N, Tarn T J. Non-time referenced modeling and control of teleoperations via internet[J]. IFAC Proceedings Volumes, 1999, 32(2): 755-760
- [10] Kang W, Xi N. Non-time referenced tracking control with application in unmanned vehicle[J]. IFAC Proceedings Volumes, 1999, 32(2): 2304-2309
- [11] Kang W, Xi N, Tan J D. Analysis and design of non-time based motion controller for mobile robots[C] //Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1999: 2964-2969
- [12] Xi N, Tarn T J. Sensor-based planning and control for robotic systems[M] //Control in Robotics and Automation. Amsterdam: Elsevier, 1999: 3-55
- [13] Chen Yibin, Xi Ning, Li Hongyi. Event-based control theories and applications[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(17): 152-158(in Chinese)
(陈宜滨, 席宁, 李洪谊. 基于事件的控制理论研究及其应用[J]. 机械工程学报, 2012, 48(17): 152-158)
- [14] Li Jie, Wei Qing, Chang Wensen. Non-time based trajectory planning and control for robots[J]. Robot, 2001, 23(1): 11-14+19 (in Chinese)
(李杰, 韦庆, 常文森. 非时间参考的机器人路径规划与控制方法[J]. 机器人, 2001, 23(1): 11-14+19)
- [15] Wang Dongyao, Ma Xudong, Dai Xianzhong. Non-time based path tracking control for mobile robots[J]. Robot, 2004, 26(3): 198-203(in Chinese)
(王栋耀, 马旭东, 戴先中. 非时间参考的移动机器人路径跟踪控制[J]. 机器人, 2004, 26(3): 198-203)