

基于五段 S 型曲线的机械手速度规划策略

徐禹翔, 徐晓光, 朱雪燕

(安徽工程大学电气工程学院, 安徽 芜湖 241000)

摘要:针对在工艺加工路径中直角坐标机械手末端合成插补速度保持一致的要求,将五段 S 型曲线加减速控制方法引入直角坐标机械手的速度控制中,提出了基于五段 S 型加减速控制曲线的预加减速控制方法,研究了算法模型以及在有匀速段和无匀速段情况下的具体加减速控制方法;并且提出了基于增加空走行程的多段连续加工路径衔接点处速度规划策略,给出了具体的速度控制方法和算法公式。仿真表明,所提出的预加减速算法和衔接点速度控制策略能够达到机械手末端合成插补速度在整个加工路径中速度保持一致的要求,并且能够有效降低加工过程中对直角坐标机械手平台的冲击。

关键词:五段 S 型曲线;速度规划;直角坐标机械手

中图分类号:TB115

文献标志码:A

引言

直角坐标机械手末端工艺加工路径通常是直线、曲线、圆弧等连接成的多类型组合路径,段间存在 $0 \sim \pi$ 的角度。很多加工场合要求在连续路径中的加工速度要保持一致。如:在焊接作业时,当焊机功率一定时,连续轨迹中速度变化会影响焊缝均匀性和美观性;在涂胶作业时,当机械手末端胶枪单位时间出胶量一定时,胶枪运动速度变化会导致速度变化段的涂胶量过大或过小,从而影响胶接效果和美观度。为此,史中权、蓝天鹏等^[1-5]提出基于 S 形加减速控制方法^[6-8]的前瞻控制算法,能够实时调整进给速度,使得在整个加工路径中保持加工速度,该类方法控制精度高效果好,但算法复杂、计算量大,对于控制器的计算能力要求较高,不适用于直角坐标机械手控制^[9]。

为了满足直角坐标机械手在连续路径中进给速度保持一致的要求,以及克服上述控制方法存在的算法复

杂、计算量大的问题,本文提出了一种基于五段 S 型速度曲线的多段连续路径直角坐标机械手末端合成插补速度规划策略,将五段 S 型速度曲线应用到机械手速度控制中,减少了计算量;提出了基于增加空走路程的多段连续路径衔接点速度控制策略,很好地满足了在连续路径速度一致性要求,给出了具体控制方法和算法方程,并通过软件仿真验证了算法的有效性。

1 五段 S 型曲线加减速控制

在数控系统中广泛应用的 S 型速度曲线中包含了七段三次样条函数,能够使得机床运动过程中加速度连续变化^[10],有效降低了加工过程的振荡和冲击。S 型加减速控制策略能够避免加速度跳变,是一种柔性加减速控制方法,满足直角坐标机械手控制要求。然而传统七段 S 型速度模型计算耗时较长^[11],若应用在机械手控制中其程序实现起来较繁琐。本文将五段 S 型曲线模型引入机械手末端合成插补速度控制中,在保证运行效果

收稿日期:2016-12-20

基金项目:安徽高校省级自然科学研究重点项目(KJ2014A024)

作者简介:徐禹翔(1992-),男,安徽合肥人,硕士生,主要从事运动控制系统方面的研究,(E-mail)944671154@163.com;

徐晓光(1972-),男,安徽明光人,副教授,硕士,主要从事机器人和信息融合方面的研究,(E-mail)16089922@qq.com

的同时减少了计算量。

1.1 五段 S 型速度曲线模型

相较于常规的七段 S 型速度曲线,取消了匀加速和匀减速两个阶段^[12],即五段 S 型速度曲线包括:加加速 q_0q_1 、减加速 q_1q_2 、匀速 q_2q_3 、加减速 q_3q_4 、减减速 q_4q_5 , 如图 1 所示。

其算法模型为:

$$a(t) = \begin{cases} Jt, & t \in (0, t_1) \\ 2Jt_1 - Jt, & t \in (t_1, t_2) \\ 0, & t \in (t_2, t_3) \\ -Jt_3 - Jt, & t \in (t_3, t_4) \\ Jt_3 - 2Jt_4 + Jt, & t \in (t_4, t_5) \end{cases} \quad (1)$$

$$v(t) = \begin{cases} \frac{1}{2}Jt^2, & t \in (0, t_1) \\ -Jt_1^2 + 2Jt_1t - \frac{1}{2}Jt^2, & t \in (t_1, t_2) \\ -Jt_1^2 + 2Jt_1t_2 - \frac{1}{2}Jt_2^2, & t \in (t_2, t_3) \\ -Jt_1^2 + 2Jt_1t_2 - \frac{1}{2}Jt_2^2 + \frac{3}{2}Jt_3^2 - Jt_3t - \frac{1}{2}Jt^2, & t \in (t_3, t_4) \\ -Jt_1^2 + 2Jt_1t_2 - \frac{1}{2}Jt_2^2 + \frac{3}{2}Jt_3^2 - Jt_3t_4 + 2Jt_4^2 + Jt_3t - 2Jt_4t + \frac{1}{2}Jt^2, & t \in (t_4, t_5) \end{cases} \quad (2)$$

式(1)与式(2)分别为五段 S 型速度模型的加速度和速度规划公式,其中 $a(t)$ 为机械手末端合成加速度, $v(t)$ 为机械手末端合成插补速度, J 是机械手末端加加速度。图 1 所示为相应的速度、加速度、加加速度曲线。在实际应用时 J 采用机械手平台所能承受的最大加加速度,可以充分发挥机械手性能,尽可能提高加减速效率^[13-14]。该模型中速度曲线平滑,加速度 $a(t)$ 无突变,有效降低对机械手平台的冲击,满足机械手末端柔性控制的要求。

1.2 加减速控制算法

在上述五段 S 曲线模型中, v_0 即为机械手在工艺加工路径段所要保持的末端合成插补速度。由模型可知加速段和减速段对称,且加加速度绝对值相等,故 $t_{01} = t_{12} = t_{34} = t_{45} = t_s$, 即加加速 q_0q_1 、减加速 q_1q_2 、加减速 q_3q_4 和减减速 q_4q_5 所消耗的时间相同;对于匀速段时间 t_{23} 要根据实际工艺加工路径长度来确定。各个路径段长度分别为: $L_{\text{加速}} = L_{\text{减速}} = L_{\text{匀速}}$, S 为工艺路径长度。

当 $S > (L_{\text{加速}} + L_{\text{减速}})$, 机械手末端合成插补速度将按

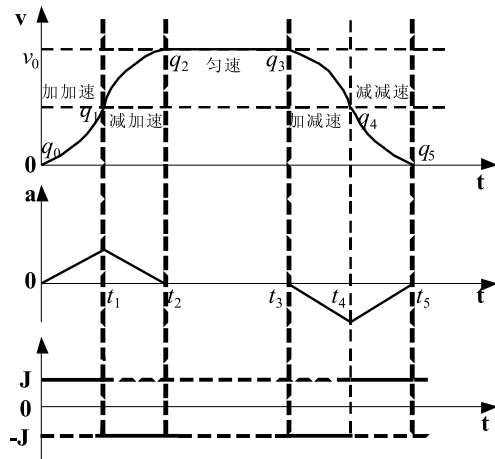


图 1 五段 S 型速度曲线

照完整五段 S 型速度曲线变化,且有 $v_0 = Jt_s^2$, 则 $t_s = \sqrt{v_0/J}$; 由式(1)与式(2)可求得, $t_s = (S - 2L_{\text{加速}})/v_0$ 。

当 $S < (L_{\text{加速}} + L_{\text{减速}})$ 时,不存在匀速段,则,那么解方程得 $t_s = (\sqrt[3]{SJ^{1/2}/2} + \sqrt[3]{SJ^{1/2}/4})/J^{1/2}$, 峰值速度 $v_m = Jt_s^2$; $S = 2Jt_s^3 = 2v_m^{3/2}J^{1/2}$, 由以上条件即可构造出无匀速段时的加减速曲线。

2 多段连续路径速度规划策略

针对多段连续运动轨迹机械手末端速度一致性要求,提出一种预加减速速度控制策略。该控制策略能够有效保证多段连续运动轨迹中机械手末端合成插补速度一致,并且能够有效降低对于机械手平台的冲击,提升机械手控制精度。

2.1 预加减速控制

如图 2 所示,以两段连续直线路径为例,其中线段 $A1A2A3$ 为机械手实际工艺加工路径, $A1$ 为起点, $A3$ 为终点,给定机械手末端加工路径段工作速度为 v_0 , 机械手按照最大加加速度 J 运行。

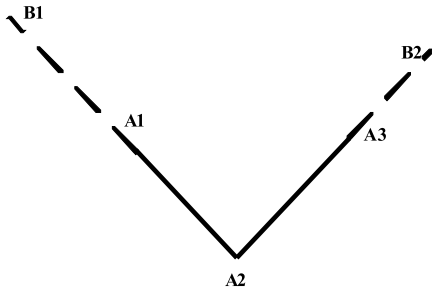


图 2 连续直线路径

常规速度控制方式为:按照 S 型曲线模型,在 A1 处机械手启动加速运行至设定工作速度 v_0 ,在 A2 点之前减速,使得到达 A2 时的速度为 0;然后在 A2 点重新启动加速至 v_0 ,最后再提前减速直至在 A3 点停止。即使采用机械手平台所能允许的最大加加速度,此种控制方式在 A1、A2、A3 点附近的机械手末端合成插补速度均小于设定速度 v_0 ,不能满足机械手匀速控制要求^[15-16]。

本文给出一种预加减速控制方法,可以使机械手末端合成插补速度在起点 A1、终点 A3 速度均为设定速度 v_0 。如图 2 所示,在实际工作路径上增加机械手空走行程 B1A1 和 A3B2,按照 S 曲线加速段模型,在 B1A1 段启动加速至 v_0 ;按照 S 曲线减速段模型,在 A3B2 段减速停止至 0,A1A2A3 段控制机械手合成插补速度(衔接点 A2 处速度规划在下文给出)。

具体实现方式:B1A1 段遵循五段 S 速度模型的加速段 q_0q_2 运动,加速到 $v_0/2$ 时加加速度由 J 变为 $-J$,使 A1 点之前机械手末端速度达到 v_0 ,接着匀速运行至 A3 点,最后按照五段 S 速度模型的减速段曲线 q_3q_5 减速至 0。根据加减速控制算法可得空走行程长度 $L_{B1A1+A3B2} = 2\sqrt{v_0^3} \cdot \sqrt{J}$,空走时间消耗 $t_{B1A1+A3B2} = 4t_s = 4\sqrt{v_0/J}$ 。采用机械手允许 J 的最大值,从而尽可能减少空走行程造成的额外时间消耗。

2.2 衔接点速度规划

多段连续轨迹中,段与段之间的 $0 \sim \pi$ 折角会造成机械手合成插补速度不连续,本文给出一种段间衔接点速度规划策略,可以保证段与段衔接点速度保持为给定速度 v_0 。

如图 3 所示,以直线与圆弧相连接的路径为例,

其中 C1C2C3 段为机械手工艺加工路径,机械手按照最大加加速度 J 运行。拐点速度规划的核心在于图 3 中虚线所示的增加的空走行程 C2C4C5C2。C5C6 为圆弧段 C2C3 的切线,该切线与 C1C4 夹角 $\theta \in (0^\circ, 180^\circ)$ 。

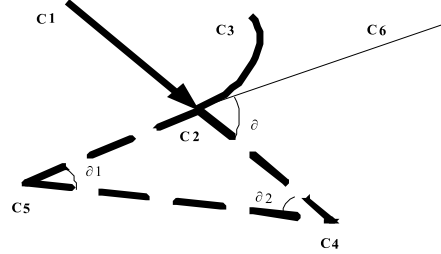


图 3 直线与圆弧连接轨迹

在空走行程中 C2 点速度为 v_0 , C4、C5 点速度为 0。C2C4 段速度规划按照图 1 中 q_3q_5 段进行,C5C2 段依照图 1 中 q_0q_2 曲线进行规划,C4C5 段则按照五段 S 型速度曲线规划。如前文所述,根据模型公式(1)和(2)以及余弦定理可计算出:

$$t_{C2C4} = t_{C5C2} = 2\sqrt{\frac{v_0}{J}} \quad (3)$$

$$L_{C2C4} = L_{t_{t_4}} + L_{t_{t_5}} = \int_{t_4}^{t_5} v(t) dt = \sqrt{v_0^3 J} = L_{C5C2} \quad (4)$$

$$L_{C4C5} = \sqrt{2v_0^3 J |1 - \cos(\pi - \theta)|} = 2\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot v_0^{\frac{3}{2}} J^{\frac{1}{2}}, \theta \in (0^\circ, 180^\circ) \quad (5)$$

由公式(4)~(5)可知: $L_{C4C5} < L_{C2C4} + L_{C5C2}$,即 C4C5 段不存在匀速段,那么依据前文所述有:

$$L_{C4C5} = 2v_m^{\frac{3}{2}} J^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$t_{C4C5} = \left(\sqrt[3]{L_{C4C5} J^{1/2} / 2} + \sqrt[3]{L_{C4C5} J^{1/2} / 4} \right) / J^{1/2} \quad (7)$$

$$v_m = J t_{C4C5}^2 \quad (8)$$

其中, v_m 为 C4C5 段的最高速度也即该段中间位置速度。联立式(5)~式(8)可得 $v_m = v_0 (\cos \frac{\theta}{2})^{2/3}$, $t_{C4C5} = 4v_m^{1/2} J^{-1/2} = 4v_0^{1/2} (\cos \frac{\theta}{2})^{1/3} J^{-1/2}$;在路径段 C4C5 中加加速段、减加速段、加减速段以及减减速段消耗的时间均相同,即 $t_m = \frac{1}{4} t_{C4C5} = v_m^{1/2} J^{-1/2} = v_0^{1/2} (\cos \frac{\theta}{2})^{1/3} J^{-1/2}$ 。

机械手平台采用最大允许 J 值进行控制,由上述已知可规划出空走行程 C2C4C5C2 的速度模型:

$$v(t) = \begin{cases} v_0 - \frac{1}{2}Jt^2, t \in (0, t_s] \\ 2Jt_0^2 - 2Jt_0t + \frac{1}{2}Jt^2, t \in (t_s, 2t_s + t_m] \\ v_s - 2J(t_m + t_s)^2 + 2J(t_m + t_s)t - \frac{1}{2}Jt^2, t \in (2t_s + t_m, 2t_s + 3t_m] \\ 2J(t_m + t_s)^2 - 2J(t_m + 2t_s)t + \frac{1}{2}Jt^2, t \in (2t_s + 3t_m, 3t_s + 4t_m] \\ v_0 - 8J(t_m + t_s)^2 + 4J(t_m + t_s)t - \frac{1}{2}Jt^2, t \in (3t_s + 3t_m, 4t_s + 4t_m] \end{cases} \quad (9)$$

3 算法仿真

采用 Matlab 软件对上述衔接点速度规划策略进行仿真, 给定参数: 机械手末端工艺加工合成插补速度 $v_0 = 35$, 机械手平台最大允许加加速度 $J = 30$, ϑ 取 $10^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 75^\circ$ 。仿真结果如图 4 所示。

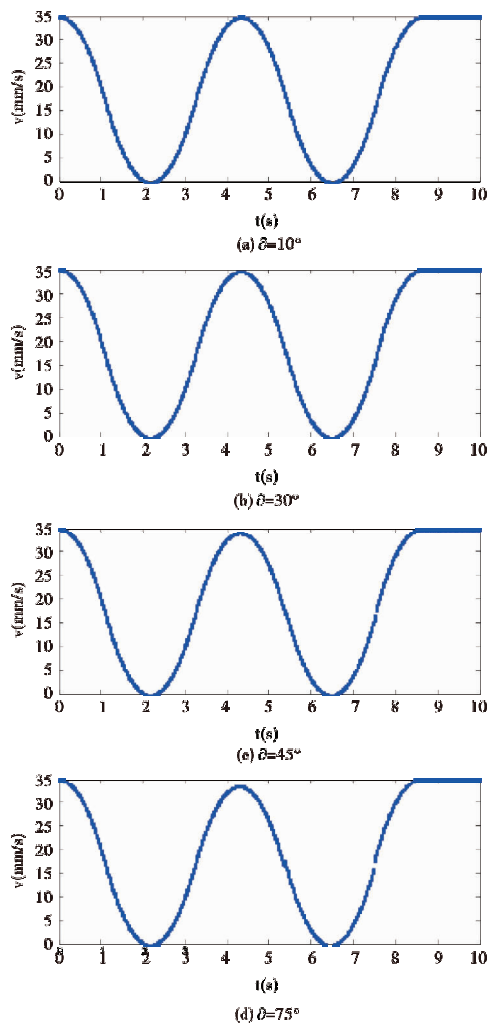


图 4 不同 ϑ 角的空走行程速度曲线

由图 4 可知, 曲线的起点速度和末端速度相同, 即式(9)给出的衔接点速度规划策略能够在多段路径连接

处保持机械手末端合成插补速度为加工工艺规定速度; 且随着角度的增大曲线峰值会相应减小即在 C4C5 段最大速度随角度成反比。仿真表明本文提出的增加空走行程的速度规划策略能够提高机械手在各类加工速度一致性要求较高场合的加工效果和最大程度降低对机械手平台的冲击。

4 结束语

本文将五段 S 型加减速曲线引入直角坐标机械手速度控制, 以此为基础提出一种预加减速策略, 使得直角坐标机械手在加工路径的起点和终点速度保持为给定的工艺加工速度; 接着又提出了多段连续加工路径衔接点处速度规划策略, 给出了速度规划的方法和具体的算法公式, 经仿真表明该控制策略能够保证路径连接点速度保持为工艺加工设定速度, 该控制方法简单高效, 具有很高的实用价值。

参考文献:

- [1] 史中权, 叶文华. 多轴联动条件下插补速度实时可调的前瞻控制算法[J]. 航空学报, 2014, 35(2): 582-592.
- [2] 蓝天鹏. 多轴联动数控系统连续小线段前瞻规划[J]. 电子设计工程, 2015, 23(19): 47-50.
- [3] Li Z G. Multi-spots parking method of injection molding manipulator [C]//Proceeding of the International Conference Electronics, Communications and Control (ICECC2011), Ningbo, China, September 9-11, 2011: 4405-4407.
- [4] LIU Y, LI H, WANG Y Z. Realization of a 5-axis NURBS interpolation with controlled angular velocity [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25(1): 124-130.
- [5] 董靖川, 王太勇, 王自静, 等. 通用型前瞻速度规划算法[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(3): 529-539.

- [6] 石川,赵彤,叶佩青.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.
- [7] 冷洪滨,鄢义杰,潘晓弘.三次多项式型微段高速加工速度规划算法研究[J].计算机集成制造系统,2008,14(2):336-340.
- [8] 刘筱,吴文江,郑颺默.柔性S型加减速控制算法研究[J].组合机床与自动化加工技术,2014(3):66-68.
- [9] ZHANG K, YUAN C M, GAO X S, et al. Agreedy algorithm for federate planning of CNC machines along curved tool paths with confined jerk[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2012, 28(4): 472-483.
- [10] 马永超.一种五段S曲线加减速算法的研究[J].工业控制计算机,2014,27(12):60-61.
- [11] 倪晓伟,刘建群,许东伟.减少冲击的五段S曲线加减速新算法研究[J].机床与液压,2016,44(17):93-97.
- [12] 史步海,孙会会.基于新S型速度规划的B样条曲线算法研究[J].机床与液压,2016,44(15):72-79.
- [13] 刘强,刘焕,周胜凯,等.连续多类型曲线段进给速度前瞻规划[J].计算机集成制造系统,2015,21(9):2369-2377.
- [14] 彭芳,黎萍,周文辉.直角坐标机械手多轴联动路径规划[J].组合机床与自动化加工技术,2012(7):71-74.
- [15] 杨林,张承瑞,王科,等.高速加工中的速度规划和段间连接[J].上海交通大学学报,2010,44(1):40-45.
- [16] 李建刚,吴响亮,李泽湘,等.连续加工路径的进给速度规划算法研究[J].哈尔滨工业大学学报,2009,41(3):29-32.

Manipulator Speed Planning Strategy Based on the Five-segment S-curve

XU Yuxiang, XU Xiaoguang, ZHU Xueyan

(College of Electrical Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

Abstract: For the requirement of maintaining the speed of manipulator in the processing path, the S-curve speed control method was introduced into controlling the speed of the manipulator. The method of acceleration-deceleration was proposed based on the improved S-curve and the speed planning strategy of the continuous-path also was proposed. The speed control method and algorithm formula were given. The simulation shows that the speed control method and strategy can achieve the requirements of the machining path of manipulator's end synthetic interpolation speed, and can effectively reduce the impact of processing process for the manipulator platform.

Key words: five-segment S-curve; speed planning; cartesian-coordinate manipulator