

doi: 10.7690/bgzd.2013.09.022

# 基于时间基准的挖掘机器人轨迹规划方法

张春华<sup>1</sup>, 唐迎佳<sup>2</sup>, 杨帆<sup>3</sup>, 康林<sup>4</sup>

(1. 中国兵器工业第五八研究所军品部, 四川 绵阳 621000; 2. 中国兵器工业第五八研究所信息中心, 四川 绵阳 621000; 3. 总装备部重庆军代局 重庆 400060; 4. 总装重庆军代局驻绵阳地区军代室, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 为实现高精度、平稳的轨迹规划和跟踪, 设计一种基于时间基准的挖掘机器人轨迹规划方法。在分析液压挖掘机器人自主作业控制特点的基础上, 以梯形速度控制和 S 形速度控制 2 种方法实现了位置、速度和加速度的变化连续, 在此基础上实现了只需要检测关节位置而不需要检测关节角速度的目的。仿真分析结果表明: 该控制策略能够实现挖掘过程中的高精度平稳控制, 减少液压系统的冲击和振动, 达到预期效果。

**关键词:** 挖掘机器人; 轨迹规划; 加减速控制; 插补

**中图分类号:** TJ306 **文献标志码:** A

## Trajectory Planning for Excavating-Robot Based on Time Benchmark

Zhang Chunhua<sup>1</sup>, Tang Yingjia<sup>2</sup>, Yang Fan<sup>3</sup>, Kang Lin<sup>4</sup>

(1. Department of Military Products, No. 58 Research Institute of China Ordnance Industries, Mianyang 621000, China; 2. Information Center, No. 58 Research Institute of China Ordnance Industries, Mianyang 621000, China; 3. PLA Representative Bureau of General Armament Department in Chongqing, Chongqing 400060, China; 4. PLA presentation Office in Mianyang District, PLA Representation Bureau of General Equipment Department in Chongqing, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** For realizing precise and stable trajectory planning and tracing, design the trajectory planning for excavating-robot based on time benchmark. Based on analyzing hydraulic excavating-robot autonomous task control features, realize continuous variation of position, speed and acceleration by using trapezoid speed control and S shape speed control. Based on this, realize detecting joint angle position and without detecting joint angle speed. The simulation analysis result shows that the control strategy can realize high precision stable control in excavating process, reduce attack and vibration of hydraulic system to achieve expected effect.

**Key words:** excavating-robot; trajectory planning; acceleration and deceleration control; interpolation

### 0 引言

液压挖掘机是一种工况复杂、用途广泛的工程机械, 在工作过程中常伴有强烈的振动、粉尘、噪声等, 操作者劳动强度大, 精神高度紧张, 极易疲劳, 同时有些特殊的工作环境不便于人员直接进入。为提高挖掘机的工作效率、改善其工作特性、减轻操作强度, 以及适应特殊环境下的作业要求, 引进自动控制势在必行, 利用挖掘机器人代替人自主作业是解决这些问题的理想方案<sup>[1]</sup>。

挖掘机器人工作过程中存在很强的非线性、不确定性和时变性, 动态响应特性变化大。如何实现高精度、平稳的轨迹规划和跟踪是挖掘机器人控制的一个关键问题<sup>[2]</sup>。基于此, 笔者在分析挖掘机器人自主作业控制特点的基础上<sup>[3]</sup>, 设计了一种基于时间基准的轨迹规划方法, 实现了挖掘过程中的高精度平稳控制。

### 1 基于位置控制的关节控制方法

#### 1.1 挖掘机器人电液比例控制系统组成

挖掘机器人的工作装置是由回转台、动臂、斗

杆、铲斗等连杆机构构成, 采用电液比例技术对其液压系统进行改造, 以满足计算机控制的需要。挖掘机器人自主作业控制系统由电液比例分系统、上位机(人机交互模块)、下位机(控制器)、压力传感器、位置传感器等部分构成, 控制模型结构如图 1 所示。电液比例分系统由比例减压阀、梭阀、多路阀等部分组成, 作业过程中控制器产生脉宽调制信号(PWM 信号), 通过调节 PWM 信号的占空比, 改变输出到比例减压阀的电压大小, 通过比例减压阀控制多路阀, 进而控制液压油缸的伸缩实现对回转台、动臂、斗杆、铲斗等关节的运动控制。

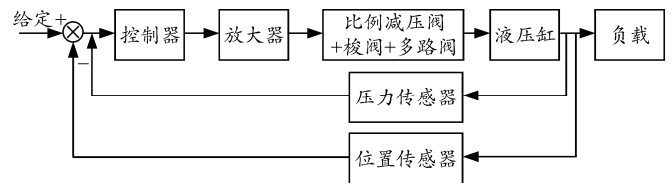


图 1 挖掘机器人电液比例控制原理图

#### 1.2 轨迹规划与控制原理

上位机实现挖掘机器人的运动轨迹规划, 目标

收稿日期: 2013-04-06; 修回日期: 2013-05-17

作者简介: 张春华(1977—), 男, 四川人, 高级工程师, 从事自动控制技术研究。

是控制铲斗达到期望轨迹。按规划结果进行位置跟踪控制，要求工作装置按一定路径运行，并满足运动速度、加速度等动态特性的连续变化。

挖掘机器人是一个大惯量系统，在运动过程中，工作装置随着关节角的变化，其惯性力、重力(负载有无和大小变化)等呈非线性变化，并且还受关节间耦合因素的影响。要使电液比例控制具有稳定性和鲁棒性，就必须做到位置、速度和加速度的连续变化，减少液压系统的冲击和振动，因此需要进行加减速控制，使各个关节按照一定的速度和位置要求协调运动。传统的位置、速度伺服控制方法按等弧长进行轨迹离散化，求取空间位置序列点，然后对速度进行控制，需要对各关节角的速度参数进行检测。要实现挖掘机器人工作装置关节角速度的精确测量较为困难，因而传统的方法难以在挖掘机器人上应用<sup>[1]</sup>。

笔者采用基于时间基准的轨迹规划方法，首先确定预定轨迹，然后对每段预定轨迹进行等时长分割，确定每一段轨迹的位置插补点，使插补点之间的时间间隔相等。该方法可以避开测速环节，因为是按等时长插补，位置插补点包含时间和空间 2 种因素，在跟踪控制过程中控制好误差范围，自然能够满足运动速度方面的要求<sup>[4]</sup>。

## 2 基于时间基准的轨迹规划方法设计

要实现挖掘机器人作业过程的稳定控制，必须做到位置、速度和加速度的变化连续，在分析比较机器人轨迹规划方法的基础上，确定了基于时间基准的轨迹规划方法，具体实现方法分为以下 2 种。

### 2.1 梯形速度控制方法

梯形速度控制的运动过程分为加速、匀速、减速 3 段，在起始阶段匀加速运动，在结束阶段匀减速运动，其速度和加速度曲线如图 2 所示。在起始段进行匀加速运动，当达到指定速度大小时，进行匀速运动，在减速段进行匀减速运动，直到速度为零时停止运动。

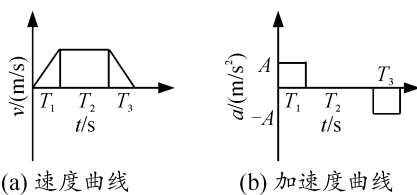


图 2 梯形速度控制的速度和加速度曲线

加速度  $a(t)$  的函数表达式为：

$$a(t) = \begin{cases} A & 0 < t \leq T_1 \\ 0 & T_1 < t \leq T_1 + T_2 \\ -A & T_1 + T_2 < t \leq T_1 + T_2 + T_3 \text{ (其中, } T_3 = T_1) \end{cases} \quad (1)$$

在具体的程序实现过程中，可以采取定时的控制方法，设定  $T_1(T_3)$  占总时长的百分比。选取一定时间周期为加速时间段，加速时，速度由 0 匀加速达到指定速度  $V_1$ ，经过一定时间的匀速运动之后，再匀减速到零。需要注意的是，匀加速和匀减速的时间周期选择要合适，过大会产生超调，过小又使得加减速太慢。

### 2.2 S 形速度控制方法

梯形速度控制方法在匀加速开始和结束、匀减速开始和结束时刻存在加速度突变，会产生一定的冲击，可对梯形速度控制进一步优化改进，采用 S 形加减速控制，通过对开始阶段和结束阶段的加速度进行衰减，来减小冲击和振动。

S 形速度控制的运行过程共分为 7 段，分别是加加速、匀加速、减加速、匀速、加减速、匀减速、减减速。其加加速度  $J(t)$ 、加速度  $a(t)$ 、速度  $v(t)$ 、位移为  $S(t)$  的通用计算公式如下：

$$J(t) = \begin{cases} J & 0 \leq t < t_1 \\ 0 & t_1 \leq t < t_2 \\ -J & t_2 \leq t < t_3 \\ 0 & t_3 \leq t < t_4 \\ -J & t_4 \leq t < t_5 \\ 0 & t_5 \leq t < t_6 \\ J & t_6 \leq t < t_7 \end{cases} \quad (2)$$

$$a(t) = \begin{cases} J\tau_1 & 0 \leq t < t_1 \\ JT_1 & t_1 \leq t < t_2 \\ JT_1 - J\tau_3 & t_2 \leq t < t_3 \\ 0 & t_3 \leq t < t_4 \\ -J\tau_5 & t_4 \leq t < t_5 \\ -JT_5 & t_5 \leq t < t_6 \\ -JT_5 + J\tau_7 & t_6 \leq t < t_7 \end{cases} \quad (3)$$

$$v(t) = \begin{cases} v_s + \frac{1}{2}J\tau_1^2 & 0 \leq t < t_1, \text{ 当 } t = t_1 \text{ 时, } v_{01} = v_s + \frac{1}{2}JT_1^2 \\ v_{01} + JT_1\tau_2 & t_1 \leq t < t_2, \text{ 当 } t = t_2 \text{ 时, } v_{02} = v_{01} + JT_1T_2 \\ v_{02} + JT_1\tau_3 - \frac{1}{2}J\tau_3^2 & t_2 \leq t < t_3, \text{ 当 } t = t_3 \text{ 时, } v_{03} = v_{02} + \frac{1}{2}JT_1^2 \\ v_{03} & t_3 \leq t < t_4, \text{ 当 } t = t_4 \text{ 时, } v_{04} = v_{03} \\ v_{04} - \frac{1}{2}J\tau_5^2 & t_4 \leq t < t_5, \text{ 当 } t = t_5 \text{ 时, } v_{05} = v_{04} - \frac{1}{2}JT_5^2 \\ v_{05} - JT_5\tau_6 & t_5 \leq t < t_6, \text{ 当 } t = t_6 \text{ 时, } v_{06} = v_{05} - JT_5T_6 \\ v_{06} - JT_5\tau_7 + \frac{1}{2}J\tau_7^2 & t_6 \leq t < t_7, \text{ 当 } t = t_7 \text{ 时, } v_{07} = v_{06} - \frac{1}{2}JT_5^2 \end{cases} \quad (4)$$

$$s(t) = \begin{cases} v_s \tau_1 + \frac{1}{6} J \tau_1^3 & 0 \leq t < t_1, \text{ 当 } t = t_1 \text{ 时, } s_{01} = v_s T_1 + \frac{1}{6} J T_1^3 \\ s_{01} + v_{01} \tau_2 + \frac{1}{2} J T_1 \tau_2^2 & t_1 \leq t < t_2, \text{ 当 } t = t_2 \text{ 时, } s_{02} = s_{01} + v_{01} T_2 + \frac{1}{2} J T_1 T_2^2 \\ s_{02} + v_{02} \tau_3 + \frac{1}{2} J T_1 \tau_3^2 - \frac{1}{6} J \tau_3^3 & t_2 \leq t < t_3, \text{ 当 } t = t_3 \text{ 时, } s_{03} = s_{02} + v_{02} T_1 + \frac{1}{3} J T_1^3 \\ s_{03} + v_{03} \tau_4 & t_3 \leq t < t_4, \text{ 当 } t = t_4 \text{ 时, } s_{04} = s_{03} + v_{02} T_1 + \frac{1}{3} J T_1^3 \\ s_{04} + v_{04} \tau_5 - \frac{1}{6} J \tau_5^3 & t_4 \leq t < t_5, \text{ 当 } t = t_5 \text{ 时, } s_{05} = s_{04} + v_{04} T_5 - \frac{1}{6} J T_5^3 \\ s_{05} + v_{05} \tau_6 - \frac{1}{2} J T_5 \tau_6^2 & t_5 \leq t < t_6, \text{ 当 } t = t_6 \text{ 时, } s_{06} = s_{05} + v_{05} T_6 - \frac{1}{2} J T_5 T_6^2 \\ s_{06} + v_{06} \tau_7 - \frac{1}{2} J T_5 \tau_7^2 + \frac{1}{6} J \tau_7^3 & t_6 \leq t < t_7, \text{ 当 } t = t_7 \text{ 时, } s_{07} = s_{06} + v_{06} T_5 - \frac{1}{2} J T_7^3 \end{cases} \quad (5)$$

式中： $v_s$  为起始速度； $t_k$  为( $k=1,2,\dots,7$ )各段的变化时刻； $\tau_k$  为( $k=1,2,\dots,7$ )各点的时间坐标，表示从该段的开始点运行的时间， $\tau_k = t - t_{k-1}$  ( $k=1,2,\dots,7$ )； $T_k$  为( $k=1,2,\dots,7$ )各段的持续运行时间。

表 1 梯形速度控制仿真数据

序号	位置/mm	速度/(mm/s)	加速度/(mm/s <sup>2</sup> )
0	0	0	0
1	0.93	12.5	83.3
2	3.75	25.0	83.3
3	8.43	37.5	83.3
4	15.00	50.0	83.3
5	22.50	50.0	0
6	30.00	50.0	0
7	37.50	50.0	0
8	45.00	50.0	0
9	52.50	50.0	0
10	60.00	50.0	0
11	67.50	50.0	0
12	75.00	50.0	0
13	82.50	50.0	0
14	90.00	50.0	0
15	97.50	50.0	0
16	105.00	50.0	0
17	111.56	37.5	-83.3
18	116.25	25.0	-83.3
19	119.07	12.5	-83.3
20	120.00	0	-83.3

### 3 基于时间基准的轨迹规划方法仿真分析

#### 3.1 梯形速度控制仿真分析

对梯形速度控制方法进行仿真，假设某关节需要规划的轨迹段总长  $L=120$  mm，最大速度  $v=50$  mm/s，采样控制周期  $\Delta t=150$  ms，匀加速和匀减速时间各为 4 个时间周期，经计算得到位置、速度、加速度值如表 1 所示，位置、速度与加速度曲线如图 3 所示。

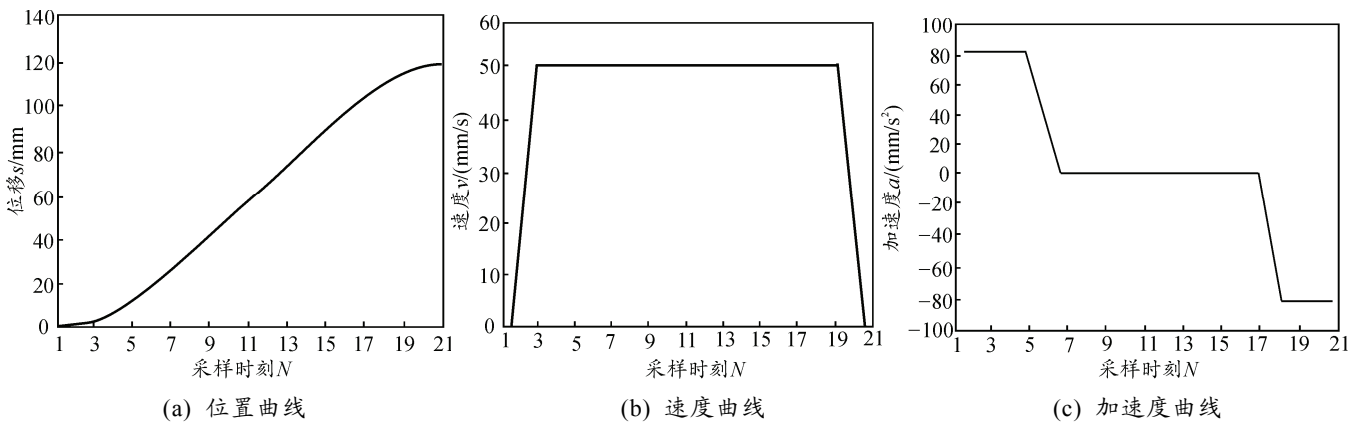


图 3 梯形速度控制的位置、速度和加速度曲线

#### 3.2 S 形速度控制仿真分析

对 S 形速度控制进行仿真，假设某关节需要规划的轨迹段总长  $L=120$  mm，最大速度  $v=50$  mm/s，采样控制周期  $\Delta t=150$  ms，起始速度为零、终点速度为零，通过加加速、匀加速、减加速各 3 个周期达到最大速度，通过式 (2)~式 (5) 计算得到各时间点的位置、速度、加速度如表 2 所示，位置、速

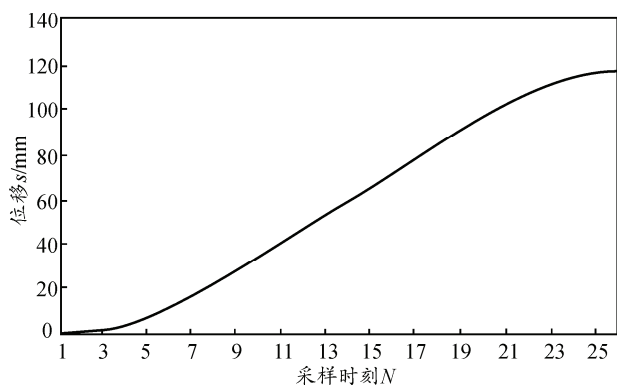
度、加速度与加加速度曲线如图 4 所示。

经仿真分析，采用这 2 种方式都能够实现挖掘机器人的轨迹跟踪控制，达到位置、速度连续变化的要求。其中梯形速度控制方法计算简单，但加速、匀速和减速过程不能平滑过渡，存在阶跃变化，因而适用于对升降速过程要求不高的场合。S 形速度控制方法基本避免了梯形速度控制中的阶跃变化，

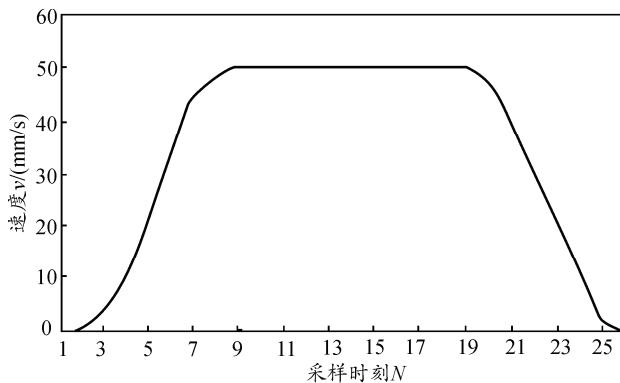
可实现平缓的加减速控制。尽管这种曲线加速度的一次微分是阶跃信号，有时还可能引起微弱的柔性冲击，但与梯形速度控制相比要小得多。

表2 S形速度控制仿真数据

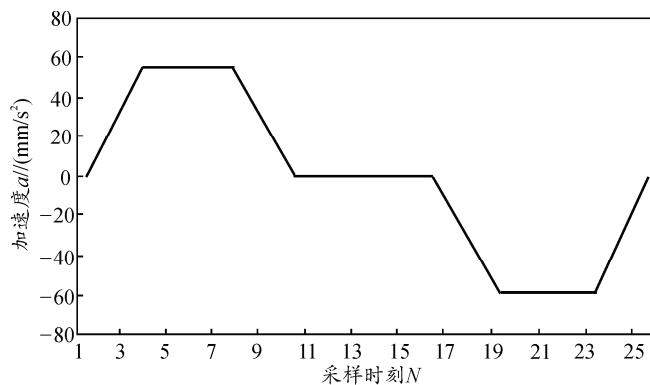
序号	位置/mm	速度/(mm/s)	加速度/(mm/s <sup>2</sup> )	加加速度/(mm/s <sup>3</sup> )
0	0	0	0	0
1	0.070	1.39	18.52	123.456 790
2	0.560	5.56	37.04	123.456 790
3	1.875	12.50	55.56	123.456 790
4	4.375	20.83	55.56	0
5	8.125	29.17	55.56	0
6	13.125	37.50	55.56	0
7	19.310	44.44	37.04	-123.456 790
8	26.820	48.61	18.52	-123.456 790
9	33.750	50.00	0	-123.456 790
10	41.250	50.00	0	0
11	48.750	50.00	0	0
12	56.250	50.00	0	0
13	63.750	50.00	0	0
14	71.250	50.00	0	0
15	78.750	50.00	0	0
16	86.250	50.00	0	0
17	93.680	48.61	-18.52	-123.456 790
18	100.69	44.44	-37.04	-123.456 790
19	106.875	37.50	-55.56	-123.456 790
20	111.875	29.17	-55.56	0
21	115.625	20.83	-55.56	0
22	118.125	12.50	-55.56	0
23	119.440	5.56	-37.04	123.456 790
24	119.930	1.39	-18.52	123.456 790
25	120.000	0	0	123.456 790



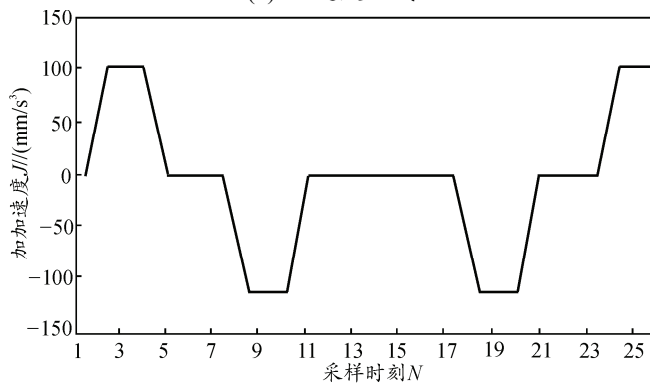
(a) 位置曲线



(b) 速度曲线



(c) 加速度曲线



(d) 加加速度曲线

图4 S形速度控制的位置、速度、加速度与加加速度曲线

#### 4 结论

经仿真验证，笔者设计的基于时间基准的轨迹规划方法，能够满足挖掘机器人运行平稳、精确操控的要求，具有较好的效果，为挖掘机器人自主作业控制系统的建立奠定了基础。下一步，将提高挖掘机器人工作效率。

#### 参考文献：

- [1] 张强. 挖掘机器人规划控制方法与技术的研究[D]. 浙江大学, 2002.
- [2] 高英杰, 晋艳超, 董建伟, 等. 液压挖掘机基于轨迹规划的控制优化[J]. 中国工程机械学报, 2006(7).
- [3] 杜丽娟, 邵杰. 基于 LCS 的机器人路径规划收敛性[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(4): 99.
- [4] 黄岩, 王启宁, 谢广明. 具有可控柔性的双足行走机器人研究进展综述[J]. 兵工自动化, 2012, 31(12): 45-52.
- [5] 潘双夏, 季炳伟, 童永峰. 基于操纵平稳性的液压挖掘机轨迹规划方法[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2006(8).
- [6] 张大庆. 液压挖掘机工作装置运动控制研究[D]. 中南大学, 2006.
- [7] 余会挺, 李丽. 液压挖掘机智能化控制系统[J]. 煤矿机电, 2008: 5.