



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110228754 A

(43)申请公布日 2019.09.13

(21)申请号 201811424588.8

B66C 13/46(2006.01)

(22)申请日 2018.11.27

(71)申请人 东南大学

地址 210096 江苏省南京市玄武区四牌楼2号

申请人 南京科远自动化集团股份有限公司  
南京闻望自动化有限公司

(72)发明人 朱昱璇 牛丹 陈有成 李奇  
魏双 刘进波

(74)专利代理机构 南京苏高专利商标事务所  
(普通合伙) 32204

代理人 柏尚春

(51) Int. Cl.

B66C 13/22(2006.01)

B66C 13/48(2006.01)

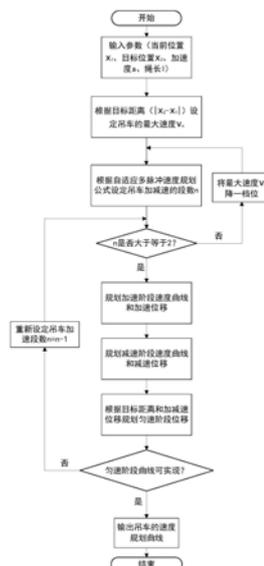
权利要求书2页 说明书5页 附图3页

(54)发明名称

一种自适应速度规划的工业吊车控制方法及系统

(57)摘要

本发明公开了一种自适应速度规划的工业吊车控制方法及系统,在给定加速度以及最大速度限制条件下,在线规划出桥式吊车运动轨迹,同时根据运动距离计算模型提出吊车多脉冲速度规划曲线,速度的脉冲数自适应规划,无需添加离线优化计算,即可实现吊车搬运物品过程中较小的摆角和较高的定位精度,极大地提高了工业生产中吊车调运物品的安全性、可靠性及工作效率。所述自适应速度规划的工业吊车控制方法及系统主要包括PLC控制器(1)、角度测量仪(2)、激光测距仪(3)、变频器(4)、交流异步电机(5)、沿横梁方向移动的吊车(6)和上位机(7)。



1. 一种自适应速度规划的工业吊车控制方法,其特征在于该方法基于Lagrange方程建立吊车系统的运动力学模型和防摇控制模型,自适应速度规划使用多段加减速实现稳定的防摇效果,速度段数和最大速度自适应控制,设定吊车的最大运行速度分为k档,第k档为最高速度,第1档为最低速度,自适应速度规划具体分为以下几个步骤:

步骤1:由当前位置 $x_1$ 和目标位置 $x_2$ 计算出目标距离( $\Delta x = |x_2 - x_1|$ ),设定吊车的最大速度 $v_n$ 等于吊车的第k档速度,根据公式  $n = \left\lceil \frac{v_n}{a \cdot T} \right\rceil$  计算出加减速段数n,其中a是吊车的设定加速度,T是吊车的单摆周期;

步骤2:判断当前加减速段数n是否大于等于2,如果n大于等于2,则继续步骤3,如果n小于2,则将吊车的最终速度 $v_n$ 降低一个档位,转到步骤1,重新计算n;

步骤3:起步加速阶段,规划加速阶段的速度曲线和加速位移,由初始速度 $v_0 = 0\text{m/s}$ ,以系统设定的加速度a加速到速度 $v_1$ ,以当前速度 $v_1$ 保持一段时间 $t_s$ 的匀速运动,再由速度 $v_1$ 以加速度a加速到速度 $v_2$ ,以当前速度 $v_2$ 保持一段时间 $t_s$ 的匀速运动,按此规律,加速n次达到目标速度 $v_n$ ,每次加速后的速度分别为 $v_1, v_2, \dots, v_n$ ,得到加速阶段的速度曲线和位移;

步骤4:停止减速阶段,规划减速阶段的速度曲线和减速位移,由减速阶段的初始速度 $v_n$ 以加速度 $-a$ 减速到速度 $v_{n-1}$ ,以当前速度 $v_{n-1}$ 保持一段时间 $t_s$ 的匀速运动,再由速度 $v_{n-1}$ 以加速度 $-a$ 减速到速度 $v_{n-2}$ ,以当前速度 $v_{n-2}$ 保持一段时间 $t_s$ 的匀速运动,按此规律,减速n次后速度为 $0\text{m/s}$ ,每次减速后的速度分别为 $v_{n-1}, \dots, v_2, v_1, 0$ ,得到减速阶段的速度曲线和位移;

步骤5:由目标距离、加速阶段位移、减速阶段位移和速度 $v_n$ 计算出匀速阶段所用时间 $t_r$ ,如果 $t_r$ 大于零,则得到匀速阶段速度曲线和位移并转到步骤6,如果 $t_r$ 小于零则将加减速段数n减1,再转到步骤2;

步骤6:输出吊车的自适应速度规划曲线。

2. 根据权利要求1所述的一种自适应速度规划的工业吊车控制方法,其特征在于步骤3中, $v_1, v_2, \dots, v_n$ 这n个速度值和 $t_s$ 时间值的设定如下:1为绳长,g为重力加速度,单摆周期

$$T = 2\pi \times \sqrt{\frac{l}{g}}$$

$$\begin{cases} v_1 = a \cdot t_0 \\ v_2 = v_1 + a \cdot 2t_0 \\ \dots\dots\dots \\ v_{n-1} = v_{n-2} + a \cdot 2t_0 \\ v_n = v_{n-1} + a \cdot t_0 \end{cases} \quad (n \geq 2)$$

$$t_s = \frac{T}{\pi} \times \arctan\left(\frac{\sin \sqrt{\frac{g}{l}} \times t_0}{1 - \cos \sqrt{\frac{g}{l}} \times t_0}\right) \quad .$$

3. 一种如权利要求1所述方法的自适应速度规划的工业吊车控制系统,其特征在于该控制系统主要包括:PLC控制器(1)、角度测量仪(2)、激光测距仪(3)、变频器(4)、交流异步电机(5)、沿横梁方向移动的吊车(6)和上位机(7);通过DCS系统中的上位机(7)组态软件实

现基于自适应速度规划的工业吊车防摇摆的控制系统,上位机(7)的输出端与PLC控制器(1)的输入端连接,用于将程序下载写入PLC控制器(1),PLC控制器(1)的输出端与变频器(4)的输入端连接,实现PLC控制器(1)对变频器(4)的控制,由变频器(4)控制交流异步电机(5)的速度,由交流异步电机(5)驱动可沿横梁方向移动的吊车(6)按规划的速度曲线移动,同时可以通过角度测量仪(2)、激光测距仪(3)将吊车的实时角度和实时位置传入DCS系统自带的上位机(7)检测软件和实时数据库系统监测吊车的速度曲线和实时角度曲线。

4.如权利要求3所述方法的自适应速度规划的工业吊车控制系统,其特征在于所述的PLC控制器(1)和上位机(7)采用科远公司自主研发的DCS系统中的模块,角度测量仪(2)采用赛特科公司的产品,激光测距仪(3)采用SICK公司的产品。

## 一种自适应速度规划的工业吊车控制方法及系统

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种针对欠驱动工业级桥式吊车的高性能防摇定位方法。通过基于自适应速度规划方法,在给定的加速度以及最大速度限制条件下,在线计算出工业级桥式吊车防摇运动轨迹的方法。

### 背景技术

[0002] 随着全球工业的发展和生产规模的扩大,桥式吊车在工业生产中的作用日趋增大,桥式吊车是一种重要的重物装卸搬运设备,在各个工业现场具有广泛应用。然而,桥式吊车在吊运过程中不可避免地会产生摇摆。因此,研究控制并消除桥式吊车吊运时的摇摆并实现精确定位,对提高工业现场的作业效率、搬运精度和工业控制自动化具有重要的意义。

[0003] 桥式吊车在吊运过程中总是不可避免地造成吊物的摇摆,通常需要非常熟练的桥式吊车操作工手动操作控制吊物的摇摆,这也是目前最为常用的做法。吊物的摇摆会加速机械磨损,增长吊物的转运时间,甚至造成安全事故。机械防摇摆都需要增加机械设备自重且造价较高,在一些尺寸要求较高的场合受到限制,不利于起重设备轻量化发展,目前新制造设备很少采用。因此通过各类算法来控制吊车运行轨迹进行防摇摆控制得到了更多的重视,防摇定位控制可以自动消除吊物在运行过程中产生的摇摆,更快地完成吊物的转运,特别是带有定位功能的自动化工业级桥式吊车,防摇摆系统可以使桥式吊车的操作变得更高效、更安全。工业现场的吊车需要行进不同的距离,针对目标距离的不确定性,给出相应的速度规划显得十分必要,本专利给出了一种速度规划防摇控制方法及系统,有效地降低桥式吊车在工作过程中的摇摆,并达到理想的定位精度。

### 发明内容

[0004] 技术问题:本发明的目的是提供一种自适应速度规划的工业吊车控制方法及系统,针对吊车在回转、搬运、制动过程中因钢绳惯性导致的重物摇摆现象,会严重影响搬运效率,甚至对地面工作人员产生危险隐患问题,本发明提出一种针对欠驱动工业级桥式吊车的高性能防摇定位方法,通过自适应速度规划控制搬运过程防摇简单易操作,不需要离线优化,提高工作效率,并满足工业级要求。

[0005] 技术方案:本发明基于自适应速度规划的工业吊车防摇摆的控制方法及系统,首先是基于Lagrange方程建立了吊车系统的运动力学模型和防摇控制模型,自适应速度规划使用多段加减速的控制算法使吊车按照规划的速度曲线运行,从而得到稳定的防摇效果,设定吊车的最大运行速度分为k档,第k档为最高速度,第1档为最低速度,自适应速度规划具体分为以下几个步骤:

[0006] 步骤1:由当前位置 $x_1$ 和目标位置 $x_2$ 计算出目标距离( $\Delta x = |x_2 - x_1|$ ),设定吊车的最大速度 $v_n$ 等于吊车的第k档速度,根据公式 $n = \left\lceil \frac{v_n}{a \cdot T} \right\rceil$ ,其中a是吊车的设定加速度,T是

吊车的单摆周期,计算出加减速段数 $n$ ;

[0007] 步骤2:判断当前加减速段数 $n$ 是否大于等于2,如果 $n$ 大于等于2,则继续步骤3,如果 $n$ 小于2,则将吊车的最终速度 $v_n$ 降低一个档位,转到步骤1,重新计算 $n$ ;

[0008] 步骤3:起步加速阶段,规划加速阶段的速度曲线和加速位移,由初始速度  $v_0$ (0m/s,静止状态)以加速度 $a$ (系统设定)加速到速度 $v_1$ ,以当前速度 $v_1$ 保持一段时间 $t_s$ 的匀速运动,再由速度 $v_1$ 以加速度 $a$ 加速到速度 $v_2$ ,以当前速度 $v_2$ 保持一段时间 $t_s$ 的匀速运动,按此规律,加速 $n$ 次达到目标速度 $v_n$ ,每次加速后的速度分别为 $v_1$ 、 $v_2$ …… $v_n$ ,得到加速阶段的速度曲线和位移;

[0009] 步骤4:停止减速阶段,规划减速阶段的速度曲线和减速位移,由初始速度  $v_n$ 以加速度 $-a$ 减速到速度 $v_{n-1}$ ,以当前速度 $v_{n-1}$ 保持一段时间 $t_s$ 的匀速运动,再由速度 $v_{n-1}$ 以加速度 $-a$ 减速到速度 $v_{n-2}$ ,以当前速度 $v_{n-2}$ 保持一段时间 $t_s$ 的匀速运动,按此规律,减速 $n$ 次后速度为0m/s,每次减速后的速度分别为 $v_{n-1}$ …… $v_2$ 、 $v_1$ 、0,得到减速阶段的速度曲线和位移;

[0010] 步骤5:由目标距离、加速阶段位移、减速阶段位移和速度 $v_n$ 计算出匀速阶段所用时间 $t_r$ ,如果 $t_r$ 大于零,则得到匀速阶段速度曲线和位移并转到步骤6,如果 $t_r$ 小于零则将加减速段数 $n$ 减1,再转到步骤2;

[0011] 步骤6:输出吊车的自适应速度规划曲线。

[0012] 根据吊车系统模型分析对 $v_1$ 、 $v_2$ …… $v_n$ 这 $n$ 个速度值和 $t_s$ 时间值的设定实现稳定的

防摇, $l$ 为绳长, $g$ 为重力加速度,单摆周期 $T = 2\pi \times \sqrt{\frac{l}{g}}$ ,设定如下:

$$[0013] \begin{cases} v_1 = a \cdot t_0 \\ v_2 = v_1 + a \cdot 2t_0 \\ \dots\dots \\ v_{n-1} = v_{n-2} + a \cdot 2t_0 \\ v_n = v_{n-1} + a \cdot t_0 \end{cases} \quad (n \geq 2) \quad (1)$$

$$t_s = \frac{T}{\pi} \times \arctan\left(\frac{\sin \sqrt{\frac{g}{l}} \times t_0}{1 - \cos \sqrt{\frac{g}{l}} \times t_0}\right) \quad (2)$$

[0014] 所述的一种自适应速度规划的工业吊车控制方法及系统,该装置主要包括: PLC控制器(1)、角度测量仪(2)、激光测距仪(3)、变频器(4)、交流异步电机(5)、沿横梁方向移动的吊车(6)和上位机(7),所述的PLC控制器(1)和上位机(6)采用科远公司自主研发的DCS系统中的模块,角度测量仪(2)采用赛特科公司的产品,、激光测距仪(3)采用SICK公司的产品。

[0015] 通过DCS系统中的上位机(7)组态软件实现基于自适应速度规划的工业吊车防摇摆的控制系统算法,其输出与PLC控制器(1)的输入连接,用于将程序下载写入PLC控制器(1),PLC控制器(1)的输出与变频器(4)的输入连接,实现PLC控制器(1)对变频器(4)的控制,由变频器(4)控制交流异步电机(5)的速度,由交流异步电机(5)驱动可沿横梁方向移动的吊车(5)按规划的速度曲线移动,同时可以通过角度测量仪(2)、激光测距仪(3)将吊车

的实时角度和实时位置传入DCS系统自带的上位机(6)检测软件和实时数据库系统监测吊车的速度曲线和实时角度曲线。

[0016] 自适应速度规划的流程图如图3所示,最终输出规划后的速度曲线,将速度值直接传入吊车电机变频器。

[0017] 有益效果:本发明提供的控制方法采用自适应速度规划的控制算法,可以自适应不同的目标距离规划出相应的速度曲线,给出运动轨迹,实现吊车工作时抑制负载摆动,并且能满足位置精度要求。

### 附图说明

[0018] 图1为本发明实施的欠驱动吊车系统的简化示意图。

[0019] 图2为本发明实施的高性能防摇定位控制方法框图。

[0020] 图3为本发明实施例的速度规划方法流程图。

[0021] 图4为本发明实施的系统总体结构框图。

### 具体实施方式

[0022] 下面结合附图,对本发明方法进行详细的阐述。

[0023] 桥式吊车小车是一种复杂的欠驱动系统,系统的独立控制变量个数小于系统自由度个数的一类非线性系统,经过简化处理后如图1所示:质量为M的桥式吊车小车在力F作用下沿x轴移动,质量为m的重物块通过钢丝绳挂在桥式吊车小车上做近似单摆运动。

[0024] 桥式吊车小车以及重物在平面坐标系的位移:

$$[0025] \quad \begin{cases} r_M = xi \\ r_m = (x + L \sin \theta) i - L \cos \theta j \end{cases} \quad (5)$$

[0026] 其中L为系统总能量,通过Euler-Lagrange方法对桥式吊车小车进行建模,得到系统的运动微分方程:

$$[0027] \quad \begin{cases} l\ddot{\theta} + \ddot{x} \cos \theta + g \sin \theta = 0 \\ (M+m)\ddot{x} + ml(\ddot{\theta} \cos \theta - \dot{\theta}^2 \sin \theta) = Q_x \end{cases} \quad (6)$$

[0028] 其中 $Q_x$ 是自由度x给桥式吊车的施加力,不计钢丝绳的重量以及空气阻力,钢丝绳刚度足够大,其长度变化可以忽略不计。由于 $\theta$ 一般小于10度, $\sin \theta \approx 0$ ,  $\cos \theta \approx 1$ ,系统微分方程简化如下:

$$[0029] \quad \begin{cases} l\ddot{\theta} + \ddot{x} + g\theta = 0 \\ (M+m)\ddot{x} + ml(\ddot{\theta} - \dot{\theta}^2) = Q_x \end{cases} \quad (7)$$

[0030] 从得出的数学模型可以看出,系统输入变量只有一个 $Q_x$ ,输出变量一个是角度 $\theta$ ,另一个是位移x,因此该系统是一个非线性二阶欠驱动系统。

[0031] 根据所得的微分方程,取初始条件: $t=0, \theta=0, \dot{\theta}=0$ ,令: $\ddot{x}=a$ ,解微分方程,令 $\theta(t) = \omega(t)$ ,可得系统的状态方程和系统运动方程如下:

$$[0032] \quad \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{g}{l} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{l} \end{bmatrix} \alpha(t) \quad (8)$$

$$[0033] \quad \left( \theta(t) + \frac{a}{g} \right)^2 + \frac{l}{g} \omega^2(t) = \left( \frac{a}{g} \right)^2 \quad (9)$$

[0034] 根据式(9)可以看到该模型满足椭圆曲线方程,如果初始状态满足 $\theta(t) = \theta(t_0)$ ,  $\omega(t) = \omega(t_0)$ ,代入式(9)中可以得到在任意时刻 $\theta(t)$ ,  $\omega(t)$ 满足如下关系:

$$[0035] \quad \begin{cases} \theta(t) = (\theta(t_0) + \frac{a}{g}) \cos \sqrt{\frac{g}{l}}t + \sqrt{\frac{l}{g}} \omega(t_0) \sin \sqrt{\frac{g}{l}}t - \frac{a}{g} \\ \omega(t) = \sqrt{\frac{g}{l}} (-\frac{a}{g} - \theta(t_0)) \sin \sqrt{\frac{g}{l}}t + \omega(t_0) \cos \sqrt{\frac{g}{l}}t \end{cases} \quad (10)$$

[0036] 根据式(10),消去t得到系统的相平面运动关系方程如下:

$$[0037] \quad \left( \theta(t) + \frac{a}{g} \right)^2 + \frac{l}{g} \omega^2(t) = \left( -\frac{a}{g} - \theta(t_0) \right)^2 + \frac{l}{g} \omega^2(t_0) \quad (11)$$

[0038] 根据式(11)可总结出三种相平面情况:在任意时刻,当初始状态 $\theta(t) = \theta(t_0)$ ,  $\omega(t) = \omega(t_0)$ 为常值, $\theta(t)$ ,  $\omega(t)$ 的相关轨迹是以点 $(-\frac{a}{g}, 0)$ 为圆心的一组同心椭圆;当小车匀速运动时, $a=0$ ,负载做中心在垂直位置上的近似单摆运动,运动轨迹是以 $(0, 0)$ 为圆心的一组同心椭圆;当初始状态 $\theta(t) = 0$ ,  $\omega(t) = 0$ ,  $\dot{\theta} = 0$ 时,运动轨迹是右端点为 $(0, 0)$ 的一组椭圆,大小与加速度a有关。

[0039] 因此通过改变加速度a来构造吊车的相平面运动轨迹,当小车匀加速或者匀减速的过程时间如果满足类单摆周期的整数倍时,摆动的角度和角速度可以回归为0,达到小车停止后消除摆动的效果。当负载角度与角速度均为0时,如果小车做匀速运动,那么负载在匀速运动阶段将不存在摆动,达到小车匀速行进过程中消除摆动的效果。为了避免在加减速过程中产生较大的角度,当小车以初始状态 $\theta(t) = 0$ ,  $\omega(t) = 0$ ,  $\dot{\theta} = 0$ ,加速度a为某一常数开始运动后,在负载达到最大角度之前,使小车角速度a从某一常数变为0,即小车开始做匀速运动,负载在相平面上的运动轨迹变为中心在原点的椭圆。此时负载角度继续增大,角速度也继续增大。当负载摆动至相同的角度,大小相同方向相反的角速度位置处,小车继续以相同加速度a向前运动,直至负载的角度和角速度回归为0,这样可以有效降低负载在加减速过程中的摆动角度。

[0040] 基于自适应速度规划的工业吊车防摇摆的控制方法及系统,实则是基于Lagrange方程建立了吊车系统的运动力学模型和防摇控制模型,自适应的速度规划使用多段加减速的控制算法使吊车按照规划的速度曲线运行,从而得到稳定的防摇效果,具体实施分为以下几个步骤:

[0041] 步骤1:由当前位置 $x_1$ 和目标位置 $x_2$ 计算出目标距离( $\Delta x = |x_2 - x_1|$ ),由自适应速度规划算法得出吊车的最大速度 $v_n$ 和加减速分段数 $n$ ;

[0042] 步骤2:起步加速阶段,由初始速度 $v_0$ (0m/s,静止状态)以加速度a(系统设定)加速到速度 $v_1$ ,以当前速度 $v_1$ 保持一段时间 $t_s$ 的匀速运动,再由速度 $v_1$ 以加速度a加速到速度 $v_2$ ,以当前速度 $v_2$ 保持一段时间 $t_s$ 的匀速运动,按此规律,加速n次达到目标速度 $v_n$ ,每次加速后的速度分别为 $v_1, v_2, \dots, v_n$ ,得到加速阶段的速度曲线和位移;

[0043] 步骤3:匀速运动阶段,按照速度规划曲线的匀速运动曲线,吊车以速度 $v_n$ 运动 $t_r$ 秒;

[0044] 步骤4:停止减速阶段,由初始速度 $v_n$ 以加速度 $-a$ 减速到速度 $v_{n-1}$ ,以当前速度 $v_{n-1}$ 保持一段时间 $t_s$ 的匀速运动,再由速度 $v_{n-1}$ 以加速度 $-a$ 减速到速度 $v_{n-2}$ ,以当前速度 $v_{n-2}$ 保持一段时间 $t_s$ 的匀速运动,按此规律,减速 $n$ 次后速度为 $0\text{m/s}$ ,每次减速后的速度分别为 $v_{n-1}\cdots v_2、v_1、0$ ,得到减速阶段的速度曲线和位移。

[0045] 本专利所述的一种自适应速度规划的工业吊车控制方法及系统,该装置主要包括:PLC控制器(1)、角度测量仪(2)、激光测距仪(3)、变频器(4)、交流异步电机(5)、沿横梁方向移动的吊车(6)和上位机(7),所述的PLC控制器(1)和上位机(6)采用科远公司(SCIYON)自主研发的DCS系统中的模块,角度测量仪(2)采用赛特科公司(SATEC)的产品,激光测距仪(3)采用SICK公司的产品。

[0046] 通过SCIYON的NT6000DCS系统中的上位机(7)组态软件实现基于自适应速度规划的工业吊车防摇摆的控制系统算法,其输出与PLC控制器(1)的输入连接,用于将程序下载写入PLC控制器(1),PLC控制器(1)的输出与变频器(4)的输入连接,实现PLC控制器(1)对变频器(4)的控制,由变频器(4)控制交流异步电机(5)的速度,由交流异步电机(5)驱动可沿横梁方向移动的吊车(5)按规划的速度曲线移动,同时可以通过SATEC公司的STAD-2000角度测量仪(2)、SICK公司的DL-100激光测距仪(3)将吊车的实时角度和实时位置传入DCS系统自带的上位机(6)检测软件和实时数据库系统监测吊车的速度曲线和实时角度曲线。

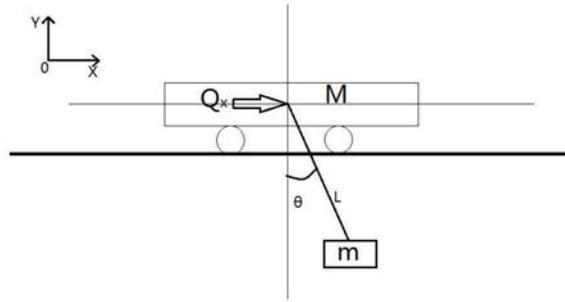


图1

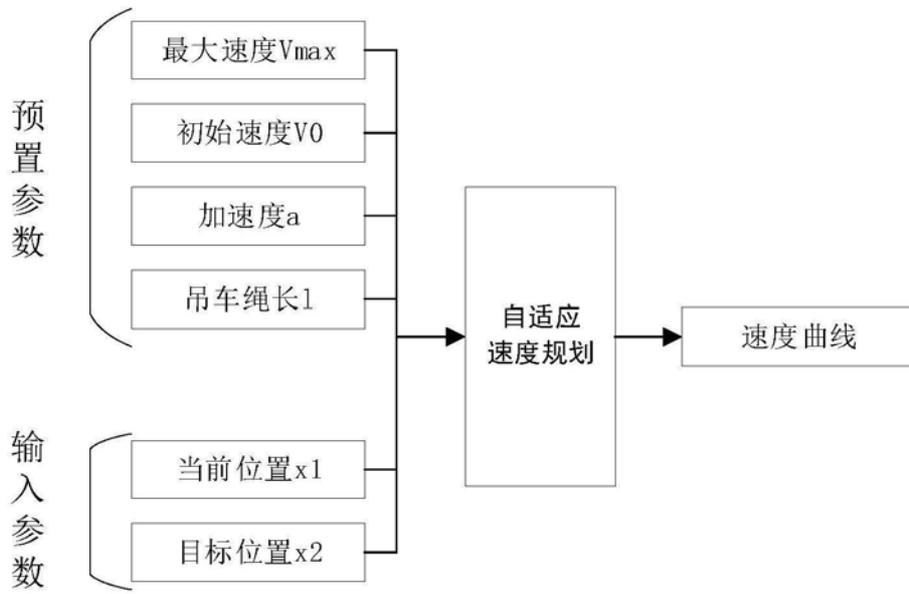


图2

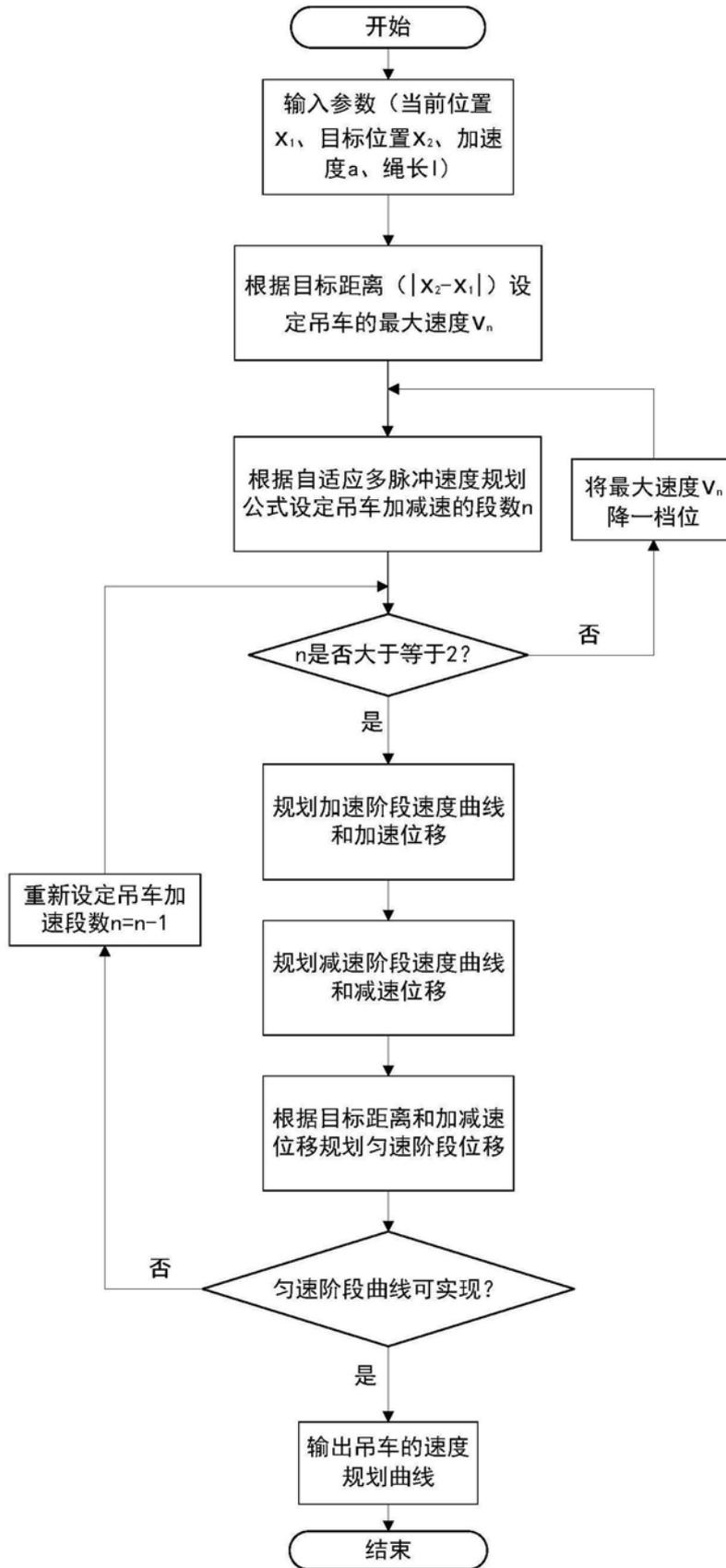


图3

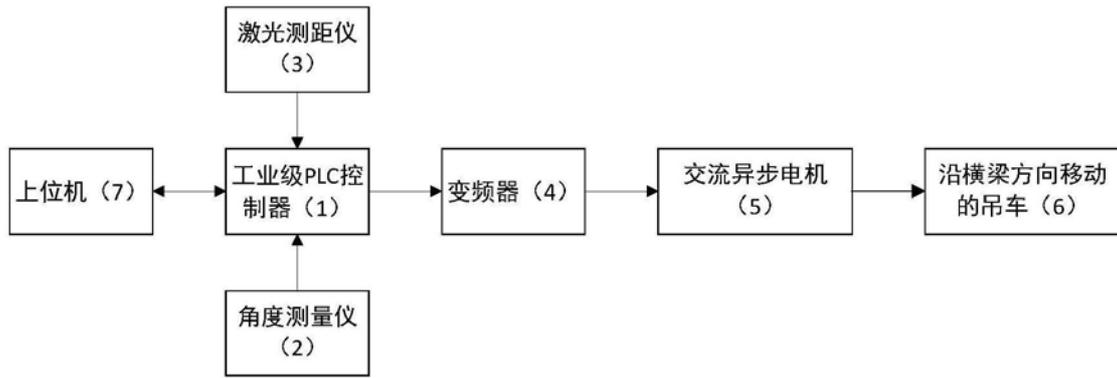


图4