第52卷第4期
2012年7月
大连理工大学学报
Journal of Dalian University of Technology
Vol.52, No.4
July 2012

文章编号：1000-8608(2012)04-0522-07

高空作业车轨迹控制设计研究

滕儒民*[1]， 屈福政[1]， 张志刚[2]， 朱苛娄[2]，

（1.大连理工大学 机械工程学院，辽宁 大连 116024；
2.大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室，辽宁 大连 116024）

摘要：针对折叠伸缩混合臂高空作业车提出了作业轨迹控制方案，实现了工作平台升降及水平直线运动时的轨迹自动控制.由两号折叠伸缩臂和飞臂组成的混合式高空作业车，工作平台轨迹控制是冗余自由度问题，其臂节变幅角度与伸长量有范围限制要求.基于一阶逆运动学数值算法设计出了工作平台直线运动轨迹闭环控制方案，针对范围受限控制变量设定了缓冲带，避免了控制率失效，实现了高空作业车作业轨迹的自动控制.

关键词：高空作业车；冗余自由度；逆运动学；轨迹闭环控制

中图分类号：TH112;TP13 **文献标志码**：A

0 引 言

高空作业车是用来运送工作人员和工作装备到达指定高度进行作业的一种大型工程机械设备，广泛应用于消防、抢险救灾、施工、安装维护等工作[1,2].按照臂架结构形式，高空作业车可分为折叠式、伸缩式和混合式，其作业高度从十几米到近百米不等[3,4].

传统的高空作业车完全依靠操作人员的视觉反馈以及机械调速阀对机构进行控制[5]，因而其作业速度和精度都受到很大的限制.随着高层建筑的大量出现，高空作业车已成为抢险救灾的必备工具.如何在复杂环境下既确保人员物资安全又尽可能地提高作业速度，是新一代高空作业车所面临的一项挑战.传统的人工操作模式越来越难以胜任[6,7].在这种背景下，改进高空作业车的轨迹控制方式成为现实中的迫切需求.

高空作业车主要由转台、伸缩箱型臂、飞臂及工作平台构成.臂节的伸缩和变幅运动由液压油缸驱动完成；与飞臂末端相连的工作平台由电液自动调平系统确保其始终保持水平.因而，工作平台的空间位置由飞臂末端轨迹决定.由于系统本身的自由度大于确定飞臂末端轨迹所需的自由度，工作平台的轨迹控制属于含冗余自由度系统的控制问题.

对于冗余自由度系统的逆运动学及轨迹规划问题国内外学者做了大量工作：Liegeois 提出了运动学优化控制的梯度投影法[8]；Chiacchio 等基于可操作度提出了适用于冗余机械腕的一阶闭环算法[9]；赵京等综合梯度投影法和最小范数法的优点提出了处理冗余度机械手逆运动学问题的次优准则混合法并对平面 3R 机械手进行了仿真研究[10]；祖迪等提出用梯度投影法所解作为固定关节法的取值的所谓的二次计算法对 7 自由度冗余机械臂进行了仿真[11]；吉爱国等将雅可比矩阵和限制条件函数对各关节位置的导数阵联合起来，提出了扩展雅可比矩阵法[12]；谢宗武等运用扩展雅可比矩阵法对 4 自由度冗余机器人进行了逆运动学求解和实验验证[13]；马博军等将移动机器人操作臂末端的自由度在移动机器人与操作臂各关节间进行了分配，并根据该自由度分配方案引入了约束条件，方便了逆运动学的求解[14]；汪军等定义了速度方向可操作度的概念，研究了双臂协调运动关节的轨迹规划[15].

上述大量工作集中于机器人或关节机械臂逆运动学和轨迹控制问题研究.这类系统一般由电

收稿日期：2010-12-07； **修回日期**：2012-05-28.
基金项目：“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAK03B09).
作者简介：滕儒民*(1973-)，男，博士，讲师，E-mail:tengrumin@163.com.

机直接驱动关节实现各种运动，其系统雅可比矩阵容易得到，可由运动学反解直接得出关节驱动量．而高空作业车由液压油缸驱动臂节变幅和伸长，其运动为油缸伸长的函数，包含强非线性，系统约束雅可比矩阵难以给出．再者，驱动油缸伸长是有一定范围限制的，导致控制变量不可能随意取值，这也给高空作业车轨迹控制设计增加了难度．

本文以折叠伸缩臂混合式高空作业车为研究对象，首先分析高空作业车特征，提出分级控制策略，建立其运动学模型；然后由一阶逆运动学数值算法提出工作平台直线运动轨迹闭环控制方案，并采用设置缓冲带的方案克服因控制变量取值范围受限所引起的控制率失效问题；最后以此为基础仿真对工作平台做垂直升降和水平直线运动进行控制的效果，验证本文所设计控制方案的可行性和可靠性．

1　运动学模型的建立

110 m 混合式高空作业车整车结构如图 1 所示，转台与一号伸缩臂通过旋转铰连接，由变幅油缸驱动；一号伸缩臂由 6 节伸缩臂组成，靠内置伸缩油缸驱动伸缩．二号伸缩臂与一号伸缩臂通过旋转铰连接，其变幅通过二号伸缩臂变幅油缸驱动；二号伸缩臂由 3 节伸缩臂组成，由内置伸缩油缸驱动实现伸缩．飞臂与二号伸缩臂通过旋转铰连接，由变幅油缸驱动变幅．工作平台与飞臂相连，通过电液自动调平系统控制其始终保持水平．

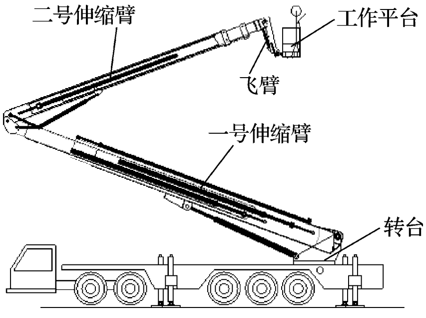


图 1　高空作业车模型

Fig. 1　Model of aerial working platform vehicle

高空作业车自带一套液压控制系统，可以控制油缸的伸缩运动，且油缸的伸缩与臂架的转动之间有着确定的数学关系．基于此关系如果给出了臂架变幅角度、角速度，相应的变幅油缸伸长量和伸长速度值可以通过数学运算得到．因此，高空作业车的轨迹控制可以采用分级控制策略：(1)由轨迹控制目标确定臂架变幅角度、角速度的变化规律．(2)根据臂架变幅角度、角速度的变化规律确定相应驱动油缸的伸缩规律．(3)将所得的油缸伸缩规律作为油缸液压控制系统的控制目标．限于篇幅，本文只对阶段(1)开展研究．

为了对系统运动进行描述，分别建立了总体基坐标系和固结在转台和各节臂上的连体基坐标系：转台连体基（x_1，y_1，z_1），z_1 轴与转台转轴一致，x_1 轴与一号伸缩臂水平放置时轴线方向一致，y_1 轴由右手法则确定；总体基（X，Y，Z）与初始时刻转台连体基一致；一号伸缩臂连体基（x_2，y_2，z_2），原点 A 为一号伸缩臂与转台转动中心，x_2 轴为一号伸缩臂轴线方向，y_2 轴为臂节截面高度方向，z_2 轴为其转轴方向；二号伸缩臂连体基（x_3，y_3，z_3），原点 B 为一号伸缩臂与二号伸缩臂转动中心，x_3 轴为二号伸缩臂轴线方向，z_3 轴与 z_2 轴一致，y_3 轴由右手法则确定；同样方法选定飞臂连体基（x_4，y_4，z_4），原点 C 为飞臂与二号伸缩臂转动中心．D 点为飞臂末端与工作平台铰点．所选取的坐标系如图 2 所示．

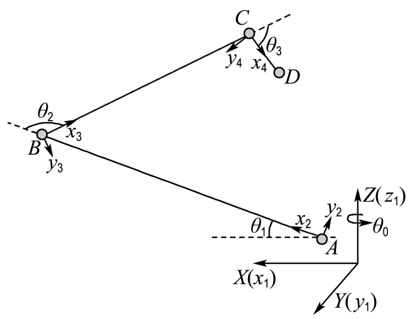


图 2　连体基坐标系选取示意图

Fig. 2　Sketch map for selection of base coordinates

总体基与转台连体基转换矩阵及其导数如下：

$$\mathbf{A}_{01}=\begin{pmatrix}\cos\theta_0 & -\sin\theta_0 & 0\\ \sin\theta_0 & \cos\theta_0 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{pmatrix};$$

$$\frac{\partial \mathbf{A}_{01}}{\partial \theta_0}=\begin{pmatrix}-\sin\theta_0 & -\cos\theta_0 & 0\\ \cos\theta_0 & -\sin\theta_0 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{pmatrix}\tag{1}$$

转台与一号伸缩臂连体基转换矩阵及其导数如下：

$$\mathbf{A}_{12}=\begin{pmatrix}\cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0\\ 0 & 0 & -1\\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0\end{pmatrix};$$

$$\frac{\partial\mathbf{A}_{12}}{\partial\theta_1}=\begin{pmatrix}-\sin\theta_1 & -\cos\theta_1 & 0\\ 0 & 0 & 0\\ \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0\end{pmatrix}\tag{2}$$

一号伸缩臂与二号伸缩臂连体基转换矩阵及其导数如下：

$$\mathbf{A}_{23}=\begin{pmatrix}\cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0\\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{pmatrix};$$

$$\frac{\partial\mathbf{A}_{23}}{\partial\theta_2}=\begin{pmatrix}-\sin\theta_2 & -\cos\theta_2 & 0\\ \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{pmatrix}\tag{3}$$

二号伸缩臂与飞臂连体基转换矩阵及其导数如下：

$$\mathbf{A}_{34}=\begin{pmatrix}\cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0\\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{pmatrix};$$

$$\frac{\partial\mathbf{A}_{34}}{\partial\theta_3}=\begin{pmatrix}-\sin\theta_3 & -\cos\theta_3 & 0\\ \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{pmatrix}\tag{4}$$

式中：θ_0 为转台转角；θ_1 为一号伸缩臂相对水平面变幅角度；θ_2 为二号伸缩臂相对一号伸缩臂变幅角度；θ_3 为飞臂相对二号伸缩臂变幅角度.

飞臂末端 D 点在总体基下矢径可以表示为

$$\boldsymbol{r}^{e}=\begin{pmatrix}x\\ y\\ z\end{pmatrix}=\mathbf{A}_{01}\begin{pmatrix}x_0\\ y_0\\ z_0\end{pmatrix}+\mathbf{A}_{01}\mathbf{A}_{12}\begin{pmatrix}L_1+s_1\\ y_1\\ z_1\end{pmatrix}+\mathbf{A}_{01}\mathbf{A}_{12}\mathbf{A}_{23}\begin{pmatrix}L_2+s_2\\ y_2\\ z_2\end{pmatrix}+\mathbf{A}_{01}\mathbf{A}_{12}\mathbf{A}_{23}\mathbf{A}_{34}\begin{pmatrix}x_3\\ y_3\\ z_3\end{pmatrix}\tag{5}$$

式中：$(x_0\quad y_0\quad z_0)$ 为一号伸缩臂与转台转动中心 A 在转台连体基下坐标；$(L_1+s_1\quad y_1\quad z_1)$ 为二号伸缩臂与一号伸缩臂转动中心 B 在一号伸缩臂连体基下坐标，L_1 为一号伸缩臂全缩长度，s_1 为一号伸缩臂伸长量；$(L_2+s_2\quad y_2\quad z_2)$ 为飞臂与二号伸缩臂转动中心 C 在二号伸缩臂连体基下坐标，L_2 为二号伸缩臂全缩长度，s_2 为二号伸缩臂伸长量；$(x_3\quad y_3\quad z_3)$ 为飞臂与工作平台铰点 D 在飞臂连体基下坐标. 对式(5)求时间导数得到飞臂末端 D 点速度：

$$\dot{\boldsymbol{r}}^{e}=\mathbf{J}(\boldsymbol{q})\,\dot{\boldsymbol{q}}\tag{6}$$

其中广义变量 $\boldsymbol{q}=(\theta_0\quad\theta_1\quad\theta_2\quad\theta_3\quad s_1\quad s_2)^{\mathrm{T}}$；雅可比矩阵的列向量分别为

$$\mathbf{J}(:,1)=\frac{\partial\mathbf{A}_{01}}{\partial\theta_0}\begin{pmatrix}x_0\\ y_0\\ z_0\end{pmatrix}+\frac{\partial\mathbf{A}_{01}}{\partial\theta_0}\mathbf{A}_{12}\begin{pmatrix}L_1+s_1\\ y_1\\ z_1\end{pmatrix}+\frac{\partial\mathbf{A}_{01}}{\partial\theta_0}\mathbf{A}_{12}\mathbf{A}_{23}\begin{pmatrix}L_2+s_2\\ y_2\\ z_2\end{pmatrix}+\frac{\partial\mathbf{A}_{01}}{\partial\theta_0}\mathbf{A}_{12}\mathbf{A}_{23}\mathbf{A}_{34}\begin{pmatrix}L_3\\ y_3\\ z_3\end{pmatrix};$$

$$\mathbf{J}(:,2)=\mathbf{A}_{01}\frac{\partial\mathbf{A}_{12}}{\partial\theta_1}\begin{pmatrix}L_1+s_1\\ y_1\\ z_1\end{pmatrix}+\mathbf{A}_{01}\frac{\partial\mathbf{A}_{12}}{\partial\theta_1}\mathbf{A}_{23}\begin{pmatrix}L_2+s_2\\ y_2\\ z_2\end{pmatrix}+\mathbf{A}_{01}\frac{\partial\mathbf{A}_{12}}{\partial\theta_0}\mathbf{A}_{23}\mathbf{A}_{34}\begin{pmatrix}L_3\\ y_3\\ z_3\end{pmatrix};$$

$$\mathbf{J}(:,3)=\mathbf{A}_{01}\mathbf{A}_{12}\frac{\partial\mathbf{A}_{23}}{\partial\theta_2}\begin{pmatrix}L_2+s_2\\ y_2\\ z_2\end{pmatrix}+\mathbf{A}_{01}\mathbf{A}_{12}\frac{\partial\mathbf{A}_{23}}{\partial\theta_2}\mathbf{A}_{34}\begin{pmatrix}L_3\\ y_3\\ z_3\end{pmatrix};$$

$$\mathbf{J}(:,4)=\mathbf{A}_{01}\mathbf{A}_{12}\mathbf{A}_{23}\frac{\partial\mathbf{A}_{34}}{\partial\theta_3}\begin{pmatrix}L_3\\ y_3\\ z_3\end{pmatrix};$$

$$\mathbf{J}(:,5)=\mathbf{A}_{01}\mathbf{A}_{12}\begin{pmatrix}1\\ 0\\ 0\end{pmatrix};$$

$$\mathbf{J}(:,6)=\mathbf{A}_{01}\mathbf{A}_{12}\mathbf{A}_{23}\begin{pmatrix}1\\ 0\\ 0\end{pmatrix}$$

2　期望轨迹的设定

飞臂末端 D 在总体基下的矢径可以表示为

$$\boldsymbol{r}^{\mathrm{d}} = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix} \tag{7}$$

高空作业车做垂直升降作业时，期望轨迹要求

$$\begin{cases} x(0) = X_0 ; x(T) = X_0 \\ y(0) = Y_0 ; y(T) = Y_0 \\ z(0) = Z_0 ; z(T) = Z_T \end{cases} \tag{8}$$

其中 X_0、Y_0、Z_0 为起始时刻 D 点的位置坐标；Z_T 为作业结束时刻 T 时 D 点的高度. 启动和结束作业时应尽可能平顺，因此除式(8) 外还要求

$$\begin{cases} \dot{x}(0) = 0;\ \dot{x}(T) = 0 \\ \dot{y}(0) = 0;\ \dot{y}(T) = 0 \\ \dot{z}(0) = 0;\ \dot{z}(T) = 0; \end{cases} \begin{cases} \ddot{x}(0) = 0;\ \ddot{x}(T) = 0 \\ \ddot{y}(0) = 0;\ \ddot{y}(T) = 0 \\ \ddot{z}(0) = 0;\ \ddot{z}(T) = 0 \end{cases} \tag{9}$$

将期望轨迹分为 3 个阶段：启动加速段、中间匀速段、终止减速段. 启动和终止阶段的轨迹为正弦函数. 满足式(8)、(9) 要求的期望轨迹可以表示为

$$\boldsymbol{r}^{\mathrm{d}} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 + f(t) \end{pmatrix} \tag{10}$$

其中

$$f(t)=\begin{cases} \dfrac{v}{2}\left[t-\dfrac{t_a}{\pi}\cos\left(\dfrac{\pi}{t_a}t+\dfrac{3\pi}{2}\right)\right];\ t\leqslant t_a \\ v\left(t-\dfrac{t_a}{2}\right);\ t_a < t \leqslant t_b \\ \dfrac{v}{2}\left[t+t_b-t_a-\dfrac{t_c-t_b}{\pi}\cos\left(\dfrac{t-t_b}{t_c-t_b}\pi+\dfrac{\pi}{2}\right)\right]; \\ \quad t_b < t \leqslant t_c \end{cases} \tag{11}$$

式中 v 表示工作平台平稳运行时的速度大小. 对式(10) 求时间导数得

$$\dot{\boldsymbol{r}}^{\mathrm{d}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{f}(t) \end{pmatrix} \tag{12}$$

其中

$$\dot{f}(t) = \begin{cases} \dfrac{v}{2}\left[1+\sin\left(\dfrac{\pi}{t_a}t+\dfrac{3}{2}\pi\right)\right];\ t\leqslant t_a \\ v;\ t_a < t \leqslant t_b \\ \dfrac{v}{2}\left[1+\sin\left(\dfrac{t-t_b}{t_c-t_b}\pi+\dfrac{1}{2}\pi\right)\right]; \\ \quad t_b < t \leqslant t_c \end{cases} \tag{13}$$

同样的方法可以设定飞臂末端进行水平直线作业时的期望轨迹.

3　闭环轨迹控制设计

飞臂末端轨迹 $\boldsymbol{r}^{\mathrm{e}}$ 的控制目标可以表示为

$$\boldsymbol{e} = \boldsymbol{r}^{\mathrm{e}} - \boldsymbol{r}^{\mathrm{d}} = \boldsymbol{0} \tag{14}$$

其中 $\boldsymbol{r}^{\mathrm{d}}$ 为期望轨迹. 将控制目标看作对轨迹的约束，按多体系统约束稳定化理论[16]，位置约束(14) 将导致速度约束：

$$\dot{\boldsymbol{e}} = \boldsymbol{0} \tag{15}$$

考虑到约束稳定化，构造一个自衰减动力学系统：

$$\dot{\boldsymbol{e}} + k\boldsymbol{e} = \boldsymbol{0} \tag{16}$$

其中 $k > 0$ 为约束稳定化参数，将式(6) 代入可以得到

$$\boldsymbol{J}\dot{\boldsymbol{q}} - \dot{\boldsymbol{r}}^{\mathrm{d}} + k\boldsymbol{e} = \boldsymbol{0} \tag{17}$$

其中 $\dot{\boldsymbol{r}}^{\mathrm{d}}$ 为期望速度.

令

$$\dot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\beta} \tag{18}$$

将其代入式(17) 可得

$$\dot{\boldsymbol{q}} = -\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{J}\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}})^{-1}(-\dot{\boldsymbol{r}}^{\mathrm{d}} + k\boldsymbol{e}) \tag{19}$$

对上式积分就可得 $\boldsymbol{q}$ 随时间的变化规律. 相应的控制方框图如图 3 所示，其中 $K(\cdot)$ 表示正向运动学分析模块.

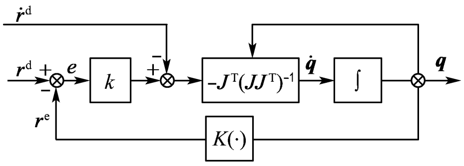


图 3　闭环控制方框图

Fig. 3　Block diagram for closed-loop control

对于高空作业车，由于结构限制，控制变量 $\boldsymbol{q}$ 的取值有一定的范围：

$$\begin{cases} 0^\circ \leqslant \theta_1 \leqslant 85^\circ \\ 10^\circ \leqslant \theta_2 \leqslant 180^\circ \\ 10^\circ \leqslant \theta_3 \leqslant 90^\circ \\ 0 \leqslant s_1 \leqslant 50\ \mathrm{m} \\ 0 \leqslant s_4 \leqslant 20\ \mathrm{m} \end{cases} \tag{20}$$

而按照控制律式(19) 积分所得的控制变量就没有考虑到这种限制，使得在实际作业中控制律不一定能够实现. 为解决这一矛盾，对 $\dot{\boldsymbol{q}}$ 的变化做某种修正，使 $\boldsymbol{q}$ 的某个分量接近其取值边界时，其变化率接近零. 具体地讲：将一号伸缩臂变幅角速度修正为

$$\dot{\theta}_1=\begin{cases}\dot{\theta}_1\big|_{\theta_1=80^\circ}\dfrac{85-\theta_1}{5};\ 80^\circ\leqslant\theta_1,0<\dot{\theta}_1\\[2ex]\dot{\theta}_1\big|_{\theta_1=5^\circ}\dfrac{0-\theta_1}{0-5};\ 5^\circ\geqslant\theta_1,0>\dot{\theta}_1\end{cases}\tag{21}$$

将二号伸缩臂变幅角速度修正为

$$\dot{\theta}_2=\begin{cases}\dot{\theta}_2\big|_{\theta_2=175^\circ}\dfrac{180-\theta_2}{180-175};\ 175^\circ\leqslant\theta_2,0<\dot{\theta}_2\\[2ex]\dot{\theta}_2\big|_{\theta_2=15^\circ}\dfrac{10-\theta_2}{10-15};\ 15^\circ\geqslant\theta_2,0>\dot{\theta}_2\end{cases}\tag{22}$$

将飞臂变幅角速度修正为

$$\dot{\theta}_3=\begin{cases}\dot{\theta}_3\big|_{\theta_3=85^\circ}\dfrac{90-\theta_3}{90-85};\ 85^\circ\leqslant\theta_3,0<\dot{\theta}_3\\[2ex]\dot{\theta}_3\big|_{\theta_3=15^\circ}\dfrac{10-\theta_3}{10-15};\ 15^\circ\geqslant\theta_3,0>\dot{\theta}_3\end{cases}\tag{23}$$

将一号伸缩臂伸长速度修正为

$$\dot{s}_1=\begin{cases}\dot{s}_1\big|_{s_1=49}\dfrac{50-s_1}{50-49};\ 49\leqslant s_1,0<\dot{s}_1\\[2ex]\dot{s}_1\big|_{s_1=1}\dfrac{0-s_1}{0-1};\ 1\geqslant s_1,0>\dot{s}_1\end{cases}\tag{24}$$

将二号伸缩臂伸长速度修正为

$$\dot{s}_2=\begin{cases}\dot{s}_2\big|_{s_2=19}\dfrac{20-s_2}{20-19};\ 19\leqslant s_2,0<\dot{s}_2\\[2ex]\dot{s}_2\big|_{s_2=1}\dfrac{0-s_2}{0-1};\ 1\geqslant s_2,0>\dot{s}_2\end{cases}\tag{25}$$

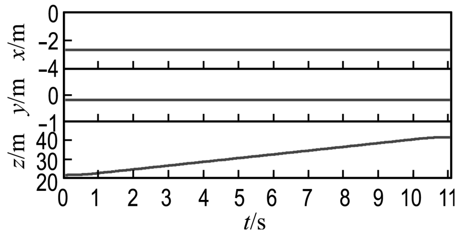
这些修正式相当于对控制变量附加了约束，可以合并到式(17)中.但它们与期望轨迹所导致的约束不同，只有在相应的控制变量接近其取值极限时，才添加到式(17)中.

4 算例仿真

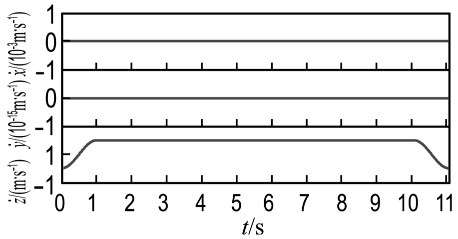
高空作业车最常用的操作是使工作平台做升降及水平直线运动，针对这种工况，利用本文所提出的控制方案，结合作者前期开发的高空作业车运动仿真软件，对高空作业的受控运动进行了数值仿真.

高空作业车做垂直升降作业时，设定运行平稳速度为 2 m/s，期望轨迹如图 4(a)、(b)所示.

图 5(a)是本文所得的飞臂末端位置坐标分量轨迹，与图 4(a)所示的期望轨迹对比后可见：两者之间的误差基本都在 mm 量级以下.图 5(b)是飞臂末端速度分量轨迹，与图 4(b)所示的期望速度轨迹对比后可见两者也很一致，误差也在每秒 mm 量级.



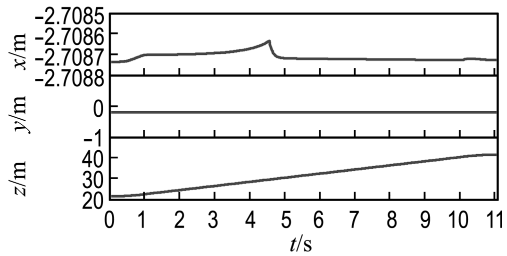
(a) 轨迹分量



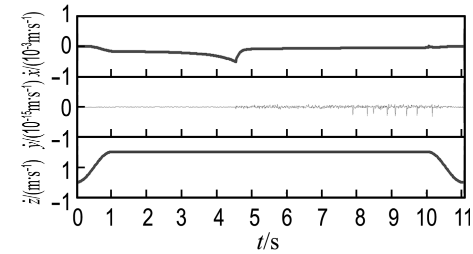
(b) 轨迹速度分量

图 4 控制目标轨迹和轨迹速度分量

Fig. 4 Components of the target controlled trajectory and the velocity of target controlled trajectory



(a) 轨迹分量



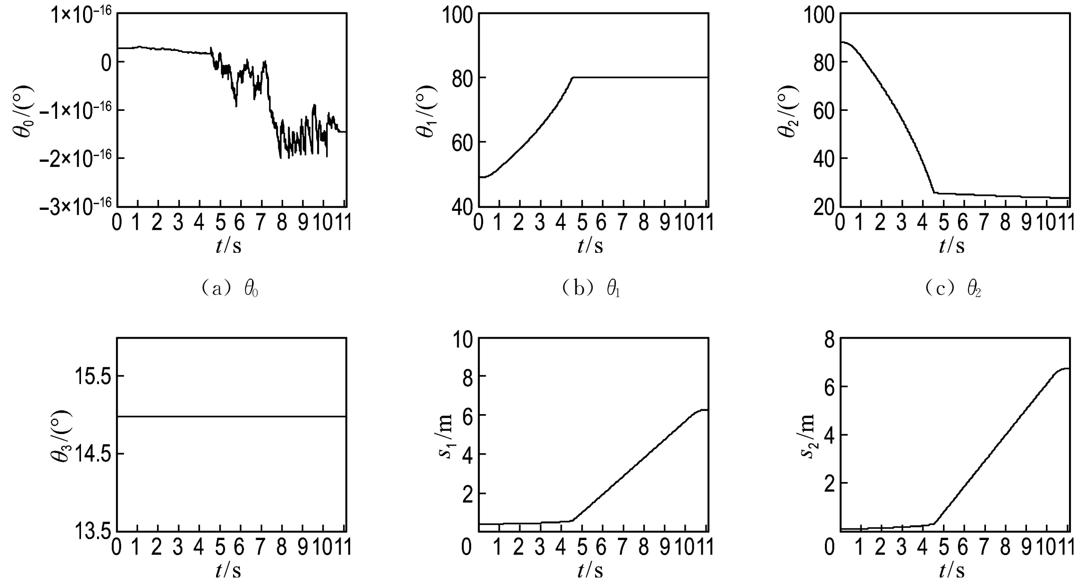
(b) 轨迹速度分量

图 5 控制仿真轨迹和轨迹速度分量

Fig. 5 Components of the simulated controlled trajectory and velocity of the simulated controlled trajectory

图 6 是控制变量随时间的变化图，从图中可以看出取值范围受限控制变量没有超出其取值范围.

以上结果验证了本文提出控制的轨迹控制方案的可行性和可靠性.



(a) θ_0　(b) θ_1　(c) θ_2

(d) θ_3　(e) s_1　(f) s_2

图 6　控制变量

Fig. 6　Controlled variables

5　结　语

本文以 110 m 折叠伸缩混合臂高空作业车为研究背景,建立了运动学模型,提出了高空作业车闭环轨迹控制方案. 通过设定缓冲带克服了控制变量取值范围受限所引起的控制率失效问题. 数值仿真结果验证了所提控制方案的有效性.

参考文献:

[1] 张　华. 纵览中国高空作业机械行业[J]. 建筑机械, 2007(10):18-22.
ZHANG Hua. Access equipment in China [J]. **Construction Machinery**, 2007(10): 18-22. (in Chinese)

[2] 马玉良. TLK21 型高空作业车电液控制系统研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2007.
MA Yu-liang. Research of electro-hydro control system of aerial work platform TLK21 [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2007. (in Chinese)

[3] 谷德君. 高空作业车调平装置动力学仿真[D]. 大连:大连理工大学, 2008.
GU De-jun. The dynamic simulation of leveling mechanism of aerial work platform [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese)

[4] 胡　元. 高空作业车工作平台调平机构[J]. 工程机械, 2006, **37**(12):34-36.
HU Yuan. Leveling mechanism for work platform on aerial vehicle [J]. **Construction Machinery and Equipment**, 2006, **37**(12):34-36. (in Chinese)

[5] 全剑敏,吴光荣,汪晓波,等. 高空作业车智能控制器的设计与开发[J]. 电子科技, 2010, **23**(1):88-90.
QUAN Jian-min, WU Guang-rong, WANG Xiao-bo, *et al*. Design and development of intelligent controller for the aerial platform vehicle [J]. **Electronic Science and Technology**, 2010, **23**(1):88-90. (in Chinese)

[6] 何　锋,董松林. 我国消防车的现状及发展方向[J]. 消防技术与产品信息, 2003(11):70-72.
HE Feng, DONG Song-lin. The developing direction and status of the fire truck in China [J]. **Fire Technique and Product Information**, 2003(11):70-72. (in Chinese)

[7] 张　华,霍玉兰. 我国高空作业车行业发展与展望[J]. 建筑机械, 2009(12):38-43.
ZHANG Hua, HUO Yu-lan. The expectation and development of the aerial work platform in China [J]. **Construction Machinery**, 2009(12): 38-43. (in Chinese)

[8] Liegeois A. Automatic supervisory control of the configuration and behavior of multibody mechanisms [J]. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, 1977, **7**(12):868-871.

[9] Chiacchio P, Siciliano B. A closed-loop Jacobin transpose scheme for solving the inverse kinematics of

non redundant and redundant wrists [J]. **Journal of Robotics Systems**, 1989, **6**(5):601-630.

[10] 赵 京,白师贤. 冗余度机械手逆运动学问题的次优准则混合法[J]. 机械科学与技术, 1996, **15**(6):939-942.

ZHAO Jing, BAI Shi-xian. The combined method with suboptimal criteria to inverse kinematic problems for redundant manipulators [J]. **Mechanical Science and Technology**, 1996, **15**(6):939-942. (in Chinese)

[11] 祖 迪,吴镇炜,谈大龙. 一种冗余机器人逆运动学求解的有效方法[J]. 机械工程学报, 2005, **41**(6):71-75.

ZU Di, WU Zhen-wei, TAN Da-long. Efficient inverse kinematic solution for redundant manipulators [J]. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, 2005, **41**(6):71-75.

[12] 吉爱国,冯汝鹏,郭 伟,等. 冗余度机器人在一般限制条件下的最优轨迹规划[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1997, **29**(2):54-56.

JI Ai-guo, FENG Ru-peng, GUO Wei, *et al*. Optimal path planning of redundant robots in general limit condition [J]. **Journal of Harbin Institute of Technology**, 1997, **29**(2):54-56. (in Chinese)

[13] 谢宗武,孙 奎,刘 宏. 扩展雅克比方法的冗余度机器人逆运动学应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, **41**(5):34-36.

XIE Zong-wu, SUN Kui, LIU Hong. Application study on inverse kinematics algorithm of redundant manipulator based on extended Jacobian method [J]. **Journal of Harbin Institute of Technology**, 2005, **41**(5):34-36. (in Chinese)

[14] 马博军,方勇纯,张雪波. 具有冗余自由度的移动操作臂逆运动学分析[J]. 控制工程, 2008, **15**(5):615-618.

MA Bo-jun, FANG Yong-chun, ZHANG Xue-bo, *et al*. Inverse kinematics analysis for mobile manipulator with redundant DOFs [J]. **Control Engineering of China**, 2008, **15**(5):615-618. (in Chinese)

[15] 汪 军,陈安军,张宏涛. 基于速度方向可操作度的双臂机器人轨迹规划[J]. 机械设计与制造, 2007(1):112-114.

WANG Jun, CHEN An-jun, ZHANG Hong-tao. Joint trajectory planning of dual armed robot based on the velocity directional manipulability measures [J]. **Machinery Design & Manufacture**, 2007(1):112-114.

[16] 齐朝晖. 多体系统动力学[M]. 北京:科学出版社, 2008.

QI Zhao-hui. **Multi-body System Dynamics** [M]. Beijing:Science Press, 2008. (in Chinese)

Study of control trajectory design for aerial working platform vehicle

TENG Ru-min*[1], QU Fu-zheng[1], ZHANG Zhi-gang[2], ZHU Ke-lou[2]

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian 116024, China)

Abstract: A control trajectory of the folding telescopic arm of the aerial working platform vehicle is proposed. The aerial working platform can move in the straight line automatically by the control of the scheme. The control trajectory is a problem of redundant DOFs that the aerial working platform vehicle consists of two telescopic booms and a fly jib. The arm's luffing angle and elongation have a restricted range. The design of the trajectory closed-loop control scheme is made based on inverse kinematics first-order numerical algorithm. By setting the buffer zone for the limited control variables, the failure of the control scheme is avoided so that the automatic trajectory control for the aerial working platform vehicle is realized.

Key words: aerial working platform vehicle; redundant DOFs; inverse kinematics; trajectory closed-loop control