基于时变引导向量场的阀口独立液压挖掘机路径跟踪控制

姜宏达[1,2] 陈俊翔[1,2] 艾 超[1,2*] 孔祥东[1,2]
1.燕山大学起重机械关键技术全国重点实验室,秦皇岛,066004
2.燕山大学河北省重型机械流体动力传输与控制实验室,秦皇岛,066004

摘要:针对液压挖掘机在复杂动态环境中自主作业难以实现高精度路径跟踪的问题,提出一种基于时变引导向量场(GVF)的层级控制架构。构造归一化时变引导向量场作为上层规划器,基于欧氏距离函数设计收敛项以驱动系统全局渐近收敛至参数化目标路径,在此基础上引入动态前馈补偿项,结合零空间投影机制消除时变路径几何形变对机械臂跟踪性能的影响,确保其对目标路径的动态跟踪能力。此外,通过Lyapunov稳定性理论证明系统在模型不确定性与外部扰动下的最终有界性,并推导扰动强度与齿尖轨迹偏差间的定量关系,进一步地,提出奇异点规避机制以确保挖掘机齿尖运动轨迹对应的向量场在全局工作空间解的唯一性和连续性。针对阀口独立液压系统,下层控制器设计进油流量-回油压力协同控制策略,对上层规划器输出指令实现高精度跟踪的同时,提高了系统能效。最后通过仿真验证了所提算法的有效性。

关键词:引导向量场;时变路径跟踪;阀口独立;流量/压力控制
中图分类号:TP601
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.08.001 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Time-varying Guidance Vector Field-based Path Following Control for Hydraulic Excavators with Independent Metering

JIANG Hongda[1,2] CHEN Junxiang[1,2] AI Chao[1,2*] KONG Xiangdong[1,2]
1.State Key Laboratory of Crane Technology, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004
2.Hebei Provincial Key Laboratory of Heavy Machinery Fluid Power Transmission and Control, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004

Abstract: It is difficult for hydraulic excavators to achieve high-precision path tracking in complex dynamic environments, a hierarchical control architecture was proposed based on time-varying GVF. Firstly, the normalized time-varying guidance vector field was constructed as the upper planner, and the convergence term was designed based on the Euclidean distance function to drive the system to converge to the parameterized target path globally. Then a dynamic feedforward compensation term was introduced, and the null space projection mechanism was used to eliminate the influences of time-varying path geometric deformation on the tracking performance of the manipulator, so as to ensure the dynamic tracking ability to the target path. In addition, the ultimate boundedness of the system under model uncertainty and external disturbance was proved by Lyapunov stability theory, and the quantitative relationship between disturbance intensity and tip trajectory deviation was derived. Furthermore, a singularity avoidance mechanism was proposed to ensure the uniqueness and continuity of the global workspace solution of the vector field corresponding to the tip trajectory of the excavators. For the independent hydraulic system of the valve port, the lower controller designed a coordinated control strategy of oil inlet flow and oil return pressure to achieve high-precision tracking of the output commands of the planner and improve the energy efficiency of the systems. Finally, the effectiveness of the algorithm was verified by simulation.

Key words: guide vector field(GVF); time-varying path tracking; independent metering; flow/pressure control

0 引言

作为能源开发与民生工程领域的高技术装备,挖掘机广泛应用于矿山开采、建筑施工及抢险

收稿日期:2025-05-12
基金项目:国家自然科学基金(52475073);广西科技计划(桂科AB24010205);燕山大学标志性专项培育项目(2022BZZD001)

救灾等场景[1]。随着智能化技术的发展，实现复杂工况下的高性能自主作业，已成为工程机械智能化转型的核心挑战与关键技术突破口[2]。

路径跟踪导航问题近年来受到机器人学[3-7]领域与控制界[8-13]的广泛关注。挖掘机自主作业的核心是任务驱动的路径跟踪控制，其目标在于引导齿尖沿预设几何路径（如特定轮廓的沟渠）实现精准挖掘而无需依赖时间参数化约束。相比之下，轨迹跟踪因需同时满足时空约束，性能受限于零动态稳定性的能量需求，路径跟踪专注于几何路径收敛，摆脱了这一限制，即使要求路径跟踪速度满足特定条件（如渐近收敛到目标值），这一优势仍成立[14]。

在众多路径跟踪算法中，时变引导向量场（guided vector field，GVF）因其几何直观性与控制高效性而备受关注[3-5,7]。其核心在于通过定义空间中每一点的方向向量，使其积分曲线全局渐近收敛至预设几何路径，将路径跟踪问题转化为几何空间的收敛任务。

在工业控制领域，被动速度场控制（passive velocity field control，PVFC）通过建立系统与物理环境的交互机制，显著提高了轮廓跟踪精度与运动稳定性[15]。进一步地，LIU等[16]、HU等[17]引入悬挂技术与多轴协同策略，解决了复杂轨迹参数化与群配置空间的适配问题，为高自由度机械臂的路径规划提供了新思路。在医疗与康复领域，分层速度场与动态约束策略的融合，引入自适应调节机制[18-19]，使得康复设备能够根据患者肌电信号柔性调整运动轨迹，兼顾了人机交互的安全性、柔顺性与治疗效率。在工程机械领域，刘永钦[20]、李兵[21]提出新型速度场，以降低多边形拐角切换时的轨迹偏差。KIM等[22]、HE等[23]在液压挖掘机位姿控制中构建了能耗-精度双目标优化模型，但未充分融合时变路径的动态特性与液压系统的非线性约束。

在向量场设计方法中，参数化曲线表征因简洁性与实用性而受到广泛关注[3,5]。ZHOU等[5]基于收缩分析理论证明了流形上时不变曲线的全局收敛性，但未涉及欧氏空间下的时变路径扩展。针对复杂几何路径，ZHU等[6]与FREW等[24]提出三维星形曲线向量场，但依赖径向傅里叶基函数近似，收敛性受基函数特性限制，难以处理非光滑或自相交拓扑问题。YAO等[13]通过扩展空间维度消除奇点，但缺乏参数化不变性且未考虑时变路径，限制了其在动态场景中的应用。LAWRENCE等[8]基于Lyapunov理论设计了收敛于圆形路径的静态向量场，并通过微分同胚扩展至一般平面曲线，但其仅适用于固定几何，无法适应时变任务。REZENDE等[9]进一步提出多无人机协同跟踪移动曲线的方法，实现了分布式路径跟踪，然而路径几何仍局限于二维平面。LIANG等[10]提出基于切向向量与欧氏距离的静态向量场，但忽略了时变特性，导致动态适应性不足。GONÇALVES等[25]通过优化技术构建向量场，支持避障与速度约束，但需隐式函数定义目标曲线，缺乏参数化构造方法，限制了其在复杂几何中的实用性。

在液压挖掘机自主作业的动态复杂场景中，静态路径规划常因无法适应实时环境演化而失效[26-27]；时变路径通过参数化曲线实时描述目标路径的几何演化，如塌方区域轮廓扩展、障碍物避让路径更新，递进式挖掘（如分层挖沟）路径动态扩展为螺旋形或阶梯形拓扑等，这种变化将路径跟踪从“预设规则驱动”升级为“几何感知规划”。

通过层级控制架构实现基于时变引导向量场方法的挖掘机路径跟踪，向量场作为上层引导规划器，通过几何指令为齿尖轨迹提供全局收敛保证，而其精确执行依赖下层液压系统的动态响应能力。基于Lyapunov稳定性证明，引入向量场导数前馈的下层控制器可实现渐近收敛[4,28]。HU等[7]验证了“向量场引导-下层控制器跟踪”架构在高速跟踪任务中的有效性。相较于积分视线法等传统算法，GVF在复杂路径下的横向跟踪误差显著减小，且控制效率与精度优势突出[7,29-30]。进一步通过不变集理论证明有界扰动下轨迹收敛至路径邻域[4,30]。针对液压挖掘机多关节强耦合特性，本文证明其不变集边界由欧氏距离函数显式定义，为动态场景下路径跟踪的鲁棒性提供理论支撑。

传统挖掘机液压传动系统的多路阀大多是进出口机械耦合[25-26]，导致执行机构压力与流量强关联，动态作业过程中面临灵活性差、控制精度低、能耗损失严重等问题[31-32]。传统液压控制研究多聚焦于单自由度优化，如流量跟踪精度，忽视能效与精度的协同性，阀口独立系统可分别调节进、回油路阀口开度，对执行器两腔的压力与流量进行解耦控制[33-35]，进而在液压系统层面实现高精度运动跟踪与能效提高的协同。

本文提出一种“时变向量场规划速度-电液系统流量压力协同跟踪”的层级控制方法，为复杂场景下工程机械路径跟踪提供了兼具高精度、强鲁棒性与能效优化的通用解决方案。

1　系统模型描述和初步说明

1.1　机械模型

本节定义挖掘机械臂的位置空间、关节空间和驱动空间，并介绍正向和反向运动学模型。

位置空间被定义为$(x,y,z,\varphi)^{\mathrm{T}}$，关节空间为$(\theta_1,\theta_2,\theta_3,\theta_4)^{\mathrm{T}}$，驱动空间为$(l_2,l_3,l_4)^{\mathrm{T}}$。关节空间反映了关节角与铲斗位置空间之间的对应关系，正向运动学定义为由驱动空间映射到位置空间的过程；反之，由位置空间映射到关节空间属于逆运动学。

根据图1中设置的坐标系，定义挖掘机的D-H参数，铲斗齿尖位置空间表示为

$$\begin{bmatrix}x\\y\\z\\\varphi\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}c_0(L_{MP}c_{234}+L_{DM}c_{23}+L_{BD}c_2+L_0)\\s_0(L_{MP}c_{234}+L_{DM}c_{23}+L_{BD}c_2+L_0)\\L_{MP}s_{234}+L_{DM}s_{23}+L_{BD}s_2+a_0\\\theta_2+\theta_3+\theta_4\end{bmatrix}\tag{1}$$

其中，s、c分别代表sin、cos函数；s_r、c_r分别表示sin θ_r、cos θ_r；s_{rst}、c_{rst}分别表示sin $(\theta_r+\theta_s+\theta_t)$、cos $(\theta_r+\theta_s+\theta_t)$。

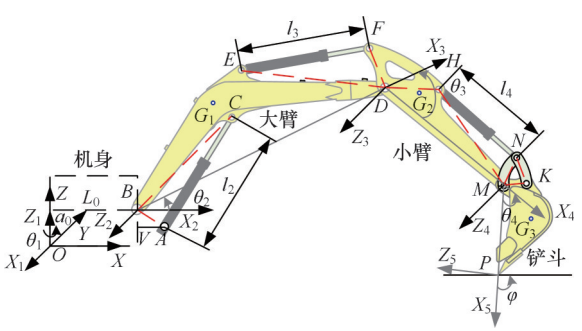


图1　挖掘机运动学模型

Fig.1　Excavator kinematics model

基于图1和式(1)中的位置空间求解挖掘机的逆运动学[27]，得到关节空间：

$$\begin{bmatrix}\theta_1\\\theta_2\\\theta_3\\\theta_4\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\arctan 2(y,x)\\\arctan\dfrac{(x_M-L_0)^2}{(z_M-a_0)^2}+\arccos\dfrac{L_{BM}^2+L_{BD}^2-L_{MP}^2}{2L_{BM}L_{BD}}\\\pi-\arccos\dfrac{L_{DM}^2+L_{BD}^2-L_{BM}^2}{2L_{DM}L_{BD}}\\\varphi+\arctan\dfrac{(x_M-L_0)^2}{(z_M-a_0)^2}-\arccos\dfrac{L_{BM}^2+L_{DM}^2-L_{BD}^2}{2L_{BM}L_{DM}}\end{bmatrix}\tag{2}$$

式中：(x_M,z_M)为点M在坐标系$OX_1Y_1Z_1$中的平面坐标。

基于欧拉-拉格朗日方程，机械臂在关节空间中的动力学方程为

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{G}(\boldsymbol{q})+\boldsymbol{T}_f(\dot{\boldsymbol{q}})+\boldsymbol{T}_d=\boldsymbol{T}_m\tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}},\ddot{\boldsymbol{q}}$分别为关节角位移、速度和加速度，$\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}},\ddot{\boldsymbol{q}}\in\mathbf{R}^3$；$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})$为惯性力产生的力矩矩阵，$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\in\mathbf{R}^{3\times3}$；$\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})$为离心力和科氏力产生的力矩矩阵，$\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\in\mathbf{R}^{3\times3}$；$\boldsymbol{G}(\boldsymbol{q})$为重力产生的力矩矩阵，$\boldsymbol{G}(\boldsymbol{q})\in\mathbf{R}^3$；$\boldsymbol{T}_f$为非线性摩擦力产生的力矩矩阵，$\boldsymbol{T}_f\in\mathbf{R}^3$；$\boldsymbol{T}_d$为未建模动力学和扰动，$\boldsymbol{T}_d\in\mathbf{R}^3$；$\boldsymbol{T}_m$为控制转矩，$\boldsymbol{T}_m\in\mathbf{R}^3$。

1.2　阀口独立液压模型

挖掘机液压系统的动态特性由比例阀的流量方程、液压缸的流量连续性方程和液压缸的力平衡方程来描述，如图2所示，以动臂联为例说明阀口独立液压系统构型。

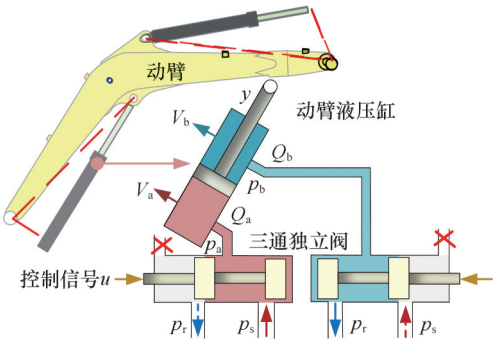


图2　阀口独立液压系统

Fig.2　Independent metering hydraulic system

考虑油液的可压缩性，液压缸的流量连续性方程表示为

$$\frac{V_{a(b)}}{\beta_e}\dot{p}_{a(b)}=\left|Q_{a(b)}-A_{a(b)}\dot{y}\right|+d_h(t)\tag{4}$$

式中：V_a、V_b分别为液压缸两腔容积；Q_a、Q_b分别为液压缸进油流量和回油流量；p_a、p_b分别为两腔压力；A_a、A_b分别为两腔承压面积；β_e为油液体积弹性模量；$d_h(t)$为液压系统未建模误差和未知扰动。

比例阀频宽远远高于系统频宽，即可简化为比例环节，$x_v=k_iu$，$k_i>0$为增益。因此，有

$$Q_a=gR_au\qquad Q_b=gR_bu\tag{5}$$

其中，$g=\sqrt{2}\,k_qk_i$，$k_q=C_dW\sqrt{1/\rho}$，C_d为流量系数，且

$$\left.\begin{aligned}R_a&=[\,s(u)\sqrt{p_s-p_a}+s(-u)\sqrt{p_a-p_r}\,]\\R_b&=[\,s(u)\sqrt{p_b-p_r}+s(-u)\sqrt{p_s-p_r}\,]\end{aligned}\right\}\tag{6}$$

式中：p_s为变量泵出口压力；p_r为油箱压力。

作用在液压机械臂关节上的力矩可表示为

$$T_m=J_a(q)(A_aP_a-A_bP_b)\tag{7}$$

其中，$J_a(q)$根据1.1节中的几何关系[27]计算。

1.3　时变向量场结构说明

本文中符号$\|\cdot\|$表示n维向量的欧几里得范数。为设计一个时变向量场$\boldsymbol{\psi}(\boldsymbol{x},t)$，使得挖掘机齿尖轨迹$\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{\psi}(\boldsymbol{x},t)$，$\boldsymbol{x}=(x,y,z)$收敛并引导其沿目标路径$C$自主作业，特作以下说明。

假设1　假设路径$C(t)$在任意固定时刻t必须是无界(无限延伸)且拓扑同胚于一条无限长的直线或有界(有限长度)且拓扑同胚于一个圆。

定义1　机械臂齿尖实时位置$\boldsymbol{x}$到目标路径$C(t)$的最近点的参数集合$s^*(\boldsymbol{x},t)$为

$$s^*(\boldsymbol{x},t)=\arg\min_s\left\|\boldsymbol{x}-\boldsymbol{r}(s,t)\right\|^2 \tag{8}$$

其中，路径$C(t)$用参数方程$\boldsymbol{r}(s,t)$表示，s是弧长参数，t是时间。$s^*(\boldsymbol{x},t)$是所有使$\boldsymbol{r}(s,t)$到$\boldsymbol{x}$的欧氏距离最小的参数s的集合。例如，若$C(t)$是圆，圆心$\boldsymbol{x}$的$s^*(\boldsymbol{x},t)$包含所有对应圆周点的参数，即

$$\boldsymbol{x}^*(\boldsymbol{x},t)=\{\boldsymbol{r}(s,t)\,|\,s\in s^*(\boldsymbol{x},t)\} \tag{9}$$

其中，$\boldsymbol{x}^*(\boldsymbol{x},t)$是路径上所有与齿尖实时位置$\boldsymbol{x}$距离最近的点的集合，仅依赖路径的几何形状，与参数化方式无关。例如，圆心对应的$\boldsymbol{x}^*(\boldsymbol{x},t)$是整个圆周。定义$D$为所有从齿尖实时位置$\boldsymbol{x}$指向其在路径$C(t)$上最近点$\boldsymbol{y}$的向量的集合：

$$D=\{\boldsymbol{x}-\boldsymbol{y}\,|\,\boldsymbol{y}\in\boldsymbol{x}^*(\boldsymbol{x},t)\} \tag{10}$$

$$D(\boldsymbol{x},t)=\left\|\boldsymbol{x}-\boldsymbol{y}\right\|\quad\forall\boldsymbol{y}\in\boldsymbol{x}^*(\boldsymbol{x},t) \tag{11}$$

其中，标量距离$D(\boldsymbol{x},t)$是量化点到路径的最短距离，是向量集合D的范数。

注1 当目标路径不随时间变化（即静态曲线）时，本文将在所有相关函数中省略时间变量t的依赖关系。对于某些奇点（如圆心），路径上存在多个点到该点的距离相等且最小，s^*、$\boldsymbol{x}^*$、D为集合而非单点，此时矢量场无法唯一确定，需通过上文定义进一步分析其特性。

定义2 定义集合U中的点集$(\boldsymbol{x},t)$是使$s^*(\boldsymbol{x},t)$只有一个元素的集。

对于U以外的点（奇点），本文不定义矢量场。可以确定这样的点很少，即对于任何固定的t，点$\boldsymbol{x}$的集合使$(\boldsymbol{x},t)\in U$的测度为零[9]。在数学上也会证明，对于时不变的情况，如果相应地设计向量场的参数，这些点是不可接近的。即使在时变情况或存在干扰的情况下，也可以简单地选择一个可能的向量来避免定义此类点。

定义3 路径的切向量$T(s,t)$定义为

$$T(s,t)=\frac{\partial\boldsymbol{r}(s,t)}{\partial s} \tag{12}$$

最近点的局部切向量定义为

$$T^*(s,t)=T^*(s^*(\boldsymbol{x},t),t) \tag{13}$$

注2 $T^*(s,t)$是目标路径在距离挖掘机齿尖位置$\boldsymbol{x}$的最近点$\boldsymbol{y}=\boldsymbol{r}(s^*(\boldsymbol{x},t),t)$处的切线方向。挖掘机齿尖到达目标路径后，沿此方向移动以自主作业。当路径不随时间变化时，省略$T^*(s,t)$中对变量t的依赖性。本文对目标路径进行弧长参数化，那么$\left\|T(s,t)\right\|=1$。但在实际应用中，如果参数s不是弧长，则切线向量的模长可能不为1，为确保向量场的不变性和稳定性，需归一化处理$\hat{T}=T/\left\|T\right\|$，否则会导致向量场受到参数化方式的影响。

假设2 假设函数$\boldsymbol{r}(s,t)$在s上对所有t都是两次可微的。此外，假设$\boldsymbol{r}(s,t)$在t上对所有固定s也是可微分的。

本文要求向量场具有常数范数v_r，即$\left\|\boldsymbol{\psi}(\boldsymbol{x},t)\right\|=v_r,\forall(\boldsymbol{x},t)\in U$，这种设计可以避免因位置或时间变化导致的速度波动，简化底层控制器设计以提高系统稳定性。对于时变路径，为保证控制系统的可行性，本文要求曲线$C(t)$的变化速度必须足够慢，使得机器人能够及时调整方向以保持跟踪。

定义4 引入零空间投影矩阵$\boldsymbol{\Pi}_T(\boldsymbol{x},t)$，用于将向量投影到与曲线切向量$T^*(\boldsymbol{x},t)$正交的子空间：

$$\boldsymbol{\Pi}_T(\boldsymbol{x},t)=\boldsymbol{I}_{n\times n}-T^*(\boldsymbol{x},t)T^*(\boldsymbol{x},t)^{\mathrm{T}} \tag{14}$$

其中，$\boldsymbol{I}_{n\times n}$是$n$阶单位矩阵。零空间$\boldsymbol{\Pi}_T(\boldsymbol{x},t)$将任意向量$\boldsymbol{v}$投影到与$T^*(s,t)$正交的子空间，由于$T^{*\mathrm{T}}T^*=1$，故$\boldsymbol{\Pi}_T(\boldsymbol{x},t)\boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}-T^*(\boldsymbol{x},t)T^*(\boldsymbol{x},t)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{v}$，$T^{*\mathrm{T}}\boldsymbol{\Pi}_T(\boldsymbol{x},t)\boldsymbol{v}=0$。若$\boldsymbol{v}$包含切线方向的分量，则$\boldsymbol{\Pi}_T(\boldsymbol{x},t)\boldsymbol{v}$仅保留法向分量。

假设3 对于挖掘机齿尖任意位置$\boldsymbol{x}$和任何时间t，若$(\boldsymbol{x},t)\in U$，此时式(3)中定义的距离向量$\boldsymbol{D}(\boldsymbol{x},t)$的时间偏导数存在。要求

$$\max_{(\boldsymbol{x},t)\in U}\left\|\boldsymbol{\Pi}_T(\boldsymbol{x},t)\frac{\partial\boldsymbol{D}}{\partial t}(\boldsymbol{x},t)\right\|=v_{\mathrm{m}}<v_r \tag{15}$$

式中：v_{m}为路径C的最大“时变速度”。

注3 距离向量的时间偏导数$\partial\boldsymbol{D}/\partial t$可以被分解为路径运动的切线分量和法向分量，当路径$C(t)$随时间移动到$C(t+\Delta t)$时，最近点可能会变化，但速度的切线分量只会导致最近点沿着路径移动，并不改变齿尖实时位置$\boldsymbol{x}$到路径的最短距离。因此，切线分量可以通过零空间投影$\boldsymbol{\Pi}_T(\boldsymbol{x},t)$移除，而挖掘机运动仅需补偿法向分量即可收敛到目标路径。

时变向量场基本结构如图3所示。本文研究的核心问题可归结为以下两个层面。

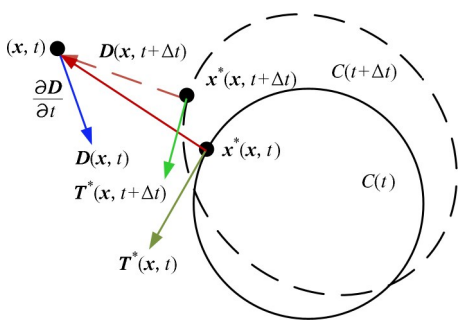


图3 时变向量场基本结构

Fig.3 Basic structure of time-varying vector field

问题1（上层时变向量场实时规划） 在假设1～3成立的条件下，针对嵌入n维欧氏空间的时变目标路径$C(t)$（参数化描述为$\boldsymbol{r}(s,t)$），设计时

变向量场 $\boldsymbol{\psi}(\boldsymbol{x},t)$，$\|\boldsymbol{\psi}(\boldsymbol{x},t)\|=v_r$，使得挖掘机齿尖的轨迹速度指令满足 $\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{\psi}(\boldsymbol{x},t)$，并保证系统从任意初始位置全局收敛至 $C(t)$，并实时跟踪该时变路径的时空演化。

问题2（下层液压系统动态协同控制） 基于阀口独立液压系统，设计进油流量与出油压力的协同调节控制策略，不仅具有提高系统控制精度、抑制内、外扰动的能力，还能有效降低系统的能耗。

2　上层时变引导向量场设计

阐述前一节定义的问题1的解决方案及其性质，并进行稳定性的证明。首先给出两个定义。

定义5 引入函数 G 是Lipschitz连续的、严格递增的，且 $G(0)=0$，因此，当 $D>0$ 时，$G(D)>0$。

本文给定一个 G 函数的简单示例：当 $k_f>0$ 时，$G(D)=\dfrac{2}{\pi}\arctan(k_fD)$。

定义6 基于函数 G，定义 $H(D)=\sqrt{1-G(D)^2}$。本文使用以下定义：

$$\left.\begin{aligned}\hat{G}(\boldsymbol{x},t)&\equiv G(D(\boldsymbol{x},t))\\ \hat{H}(\boldsymbol{x},t)&\equiv H(D(\boldsymbol{x},t))\end{aligned}\right\}\tag{16}$$

注4 当目标路径非时变时，省略 $\hat{G}(\boldsymbol{x},t)$ 和 $\hat{H}(\boldsymbol{x},t)$ 中对时间变量 t 的依赖性。

这里先给出本节的结论，设计时变引导向量场控制信号为

$$\boldsymbol{\psi}(\boldsymbol{x},t)=-\eta(\boldsymbol{x},t)\hat{G}(\boldsymbol{x},t)\frac{\boldsymbol{D}(\boldsymbol{x},t)}{D(\boldsymbol{x},t)}+\eta(\boldsymbol{x},t)\hat{H}(\boldsymbol{x},t)T^*(s,t)-\boldsymbol{\Pi}_T(\boldsymbol{x},t)\frac{\partial\boldsymbol{D}}{\partial t}(\boldsymbol{x},t)\tag{17}$$

注5 该向量场的三个分量分别定义为收敛项、切向运动项和前馈项，每个分量负责不同的行为[3]，特别地，与传统基于隐式目标曲线控制方法相比，本文基于参数化方程设计向量场的方法更为直接。函数 $\hat{G}$ 和 $\hat{H}$ 负责调整收敛和切向运动分量之间的相对权重，时间前馈补偿项补偿目标路径的法向运动，确保挖掘机齿尖跟踪路径的最新位置；而标量因子 η 定义了向量场的范数。

本节所设计的时变向量场应具有以下特征：

1）对于挖掘机齿尖任意初始位置 $(\boldsymbol{x}_0,0)\in U$，轨迹 $\boldsymbol{x}(t)$ 都能渐近收敛到时变目标路径 $C(t)$（命题2）。

2）基于假设3，总能选择标量因子 $\eta(\boldsymbol{x},t)$，使时变矢量场的范数恒定为 $\|\boldsymbol{\psi}(\boldsymbol{x},t)\|=v_r$（引理6）。

3）集合 U 外的点构成一个测度为零的集合（命题1），奇点在挖掘机作业的全局空间中可忽略，保证系统正常工作时不会进入多值区域。此外，对于时不变情况，可通过设计参数 $\hat{G}$ 使 U 外的点不可达（命题4）。并且，即使在时变曲线的情况下或系统存在干扰时到达了这些点，选择与当前速度方向或最近运动方向一致的最近点的指令 $\boldsymbol{\psi}(\boldsymbol{x},t)$，脱离奇点后继续沿向量场移动。

4）在挖掘机自主作业模型中，对于外部有界干扰具有鲁棒性。这确保挖掘机齿尖作业轨迹对目标路径的最大偏差是有限的，系统的最大允许偏离取决于干扰强度的量化范数（命题3）。

5）其收敛行为在空间上是各向同性的。这意味着收敛项的权重不取决于向量 $\boldsymbol{D}$ 的方向，而仅取决于距离 D（命题3）。

2.1　距离函数性质分析

引理1 假设挖掘机齿尖位置为 $\boldsymbol{x}$，令 $\boldsymbol{x}^*$ 是路径 C 上最接近齿尖位置 $\boldsymbol{x}$ 的点之一。定义 $0<a<1$，则另一个位置 $\boldsymbol{x}_{\text{mid}}=(1-a)\boldsymbol{x}^*+a\boldsymbol{x}$ 映射在路径上的最近点也是 $\boldsymbol{x}^*$，且这个最近点是唯一的。

证明：假设存在路径 C 上另一点 $\boldsymbol{y}^*$ 小于或等于 $\boldsymbol{x}^*$ 到位置 $\boldsymbol{x}_{\text{mid}}$ 的距离。引入 $u=\|\boldsymbol{x}^*-\boldsymbol{x}_{\text{mid}}\|$，$v=\|\boldsymbol{y}^*-\boldsymbol{x}^*\|$。易知 $\|u+v\|\leqslant\|u\|$ 不成立，则假设不成立。

命题1 对于 $\mathbf{R}^n$ 中任意目标路径 C，对应奇点的集合在 $\mathbf{R}^n$ 中是测度为零的（在空间中“体积”为零，平面中“面积为零”，数学上称为测度为零）。

注6 这证明奇点在挖掘机齿尖实际作业过程中几乎不可达，即使意外进入，通过方向选择规则（如沿最近速度方向）可确保系统继续运行。

引理2 基于定义1，时变曲线跟踪中距离向量与切线向量具有正交性。即

$$T^*(\boldsymbol{x},t)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}(\boldsymbol{x},t)=T^*(s^*(\boldsymbol{x},t),t)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}(\boldsymbol{x},t)=0\tag{18}$$

引理3 欧几里得距离函数的梯度是一个单位向量，且指向曲线的法线方向，即

$$\nabla D(\boldsymbol{x},t)=\boldsymbol{D}(\boldsymbol{x},t)/D(\boldsymbol{x},t)\tag{19}$$

引理4 构造基于欧几里得距离函数的Lyapunov函数 $P=D^2/2$，$\forall(\boldsymbol{x},t)\in U$，以下恒等式成立：

$$\frac{\partial P}{\partial t}=\nabla P^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Pi}_T\frac{\partial\boldsymbol{D}}{\partial t}\tag{20}$$

证明：根据链式规则得到 $\nabla P=D\nabla D$。基于引理3得出结论：

$$\nabla P(\boldsymbol{x},t)=\boldsymbol{D}(\boldsymbol{x},t)\tag{21}$$

并注意到当 $D=0$ 时，$\nabla P=D\nabla D=0$。考虑到 $P=\dfrac{1}{2}D^2=\dfrac{1}{2}\boldsymbol{D}^2$，直接对时间求导可得

$$\frac{\partial P}{\partial t}=\frac{1}{2}\frac{\partial \boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}}{\partial t}\boldsymbol{D}+\frac{1}{2}\boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}\frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t}=\boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}\frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} \tag{22}$$

考虑到零空间投影矩阵 $\boldsymbol{\Pi}_T$ 的性质，且 $\nabla P /\!/ \boldsymbol{D} \perp \boldsymbol{T}$，有

$$\frac{\partial P}{\partial t}=\nabla P^{\mathrm{T}}\frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t}=\nabla P^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Pi}_T\frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} \tag{23}$$

注7 Lyapunov函数的导数反映控制系统的收敛性，该引理为分析跟踪时变路径的挖掘机齿尖作业系统的稳定性提供了关键工具。

2.2 归一化方法及稳定性证明

本文提出的归一化思想旨在解决时变矢量场的恒定范数问题，同时确保系统的收敛性和鲁棒性。所设计的时变引导向量场控制信号由三部分单独的矢量场叠加而成。图4所示为时变向量场方法中的三个关键分量及其合成效果。

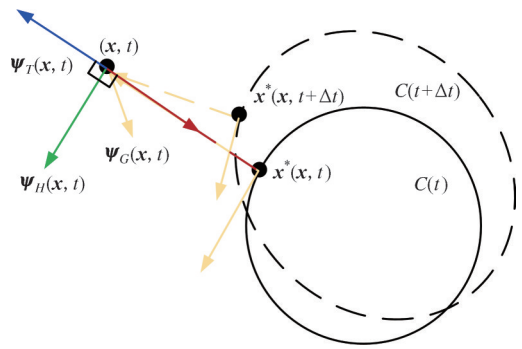


图4 时变引导向量场控制信号组成

Fig.4 Time-varying steering vector field control signal composition

驱动挖掘机齿尖轨迹向目标路径收敛的分量定义为收敛项：

$$\boldsymbol{\psi}_G(\boldsymbol{x}, t)=-\hat{G}(\boldsymbol{x}, t)\frac{\nabla P(\boldsymbol{x}, t)}{\left\|\nabla P(\boldsymbol{x}, t)\right\|}=-\hat{G}(\boldsymbol{x}, t)\nabla D(\boldsymbol{x}, t) \tag{24}$$

引导挖掘机齿尖沿路径切线方向作业的分量定义为切向运动项：

$$\boldsymbol{\psi}_H(\boldsymbol{x}, t)=\hat{H}(\boldsymbol{x}, t)\boldsymbol{T}^*(s, t) \tag{25}$$

补偿路径时变运动的预测分量为时间前馈补偿项：

$$\boldsymbol{\psi}_T(\boldsymbol{x}, t)=-\boldsymbol{\Pi}_T(\boldsymbol{x}, t)\frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t}(\boldsymbol{x}, t) \tag{26}$$

为保证时不变向量场具有可控恒定速度 v_r，需要进行归一化处理。对于时不变向量场，仅调整场的比例因子 $\eta(\boldsymbol{x}, t)$ 即可实现 $\left\|\boldsymbol{\psi}(\boldsymbol{x}, t)\right\|=v_r$。但对于时变向量场，若缩放前馈项 $\boldsymbol{\psi}_T(\boldsymbol{x}, t)$，会导致其无法正确补偿目标路径的动态变化，从而破坏系统的收敛性。

本文提出分离可缩放与不可缩放分量的归一化方法，将这三个分量分为两组。第一组为 $\boldsymbol{\psi}_S(\boldsymbol{x}, t)$，由 $\boldsymbol{\psi}_G(\boldsymbol{x}, t)$ 和 $\boldsymbol{\psi}_H(\boldsymbol{x}, t)$ 组成，不依赖时间偏导数，称为可缩放分量，通过比例因子 $\eta(\boldsymbol{x}, t)$ 调整其范数。第二组仅由 $\boldsymbol{\psi}_T(\boldsymbol{x}, t)$ 组成，依赖时间偏导数，称为不可缩放分量，保持原始形式确保对运动的精确补偿。

因此，时变向量场可定义为以下形式：

$$\boldsymbol{\psi}=\eta\boldsymbol{\psi}_S+\boldsymbol{\psi}_T \tag{27}$$

引理5 $\forall(\boldsymbol{x}, t)\in U$，可缩放分量 $\boldsymbol{\psi}_S=\boldsymbol{\psi}_G+\boldsymbol{\psi}_H$ 的范数恒为1。

证明：根据引理2，在最近点 $\boldsymbol{x}^*$ 处，曲线的切线向量与距离向量正交 $\boldsymbol{T}^*(\boldsymbol{x}, t)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}(\boldsymbol{x}, t)=0$。易证收敛项与切向运动项的点积为 $\boldsymbol{\psi}_G^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\psi}_H=-\hat{G}\hat{H}\nabla\boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{T}^*=0$。由于正交性，$\left\|\boldsymbol{\psi}_S\right\|^2=\left\|\boldsymbol{\psi}_G+\boldsymbol{\psi}_H\right\|^2=\hat{G}^2+\hat{H}^2=1$。

考虑到 $\left\|\boldsymbol{\psi}\right\|=v_r$，则 $\left\|\eta\boldsymbol{\psi}_S+\boldsymbol{\psi}_T\right\|=v_r$，展开为

$$\eta^2+(2\boldsymbol{\psi}_S^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\psi}_T)\eta+(\left\|\boldsymbol{\psi}_T\right\|^2-v_r^2)=0 \tag{28}$$

为了确保 $\eta>0$，应考虑二阶多项式的正根：

$$\eta=-\boldsymbol{\psi}_S^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\psi}_T+\sqrt{(\boldsymbol{\psi}_S^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\psi}_T)^2+v_r^2-\left\|\boldsymbol{\psi}_T\right\|^2} \tag{29}$$

引理6 基于三角不等式原理，η 具有以下范围：

$$0<v_r-v_m<\eta<v_m+v_r \tag{30}$$

引理7 引入 $z:\mathbf{R}\to\mathbf{R}$ 且始终非负，常数 $\beta>0$，对于 G 函数，满足微分方程 $\dot{z}(t)=-\beta G(z(t))$，对于任意初始条件 $z(0)\geqslant 0$，有 $\lim\limits_{t\to\infty}z(t)=0$。

假设4 给定挖掘机齿尖任意初始时刻对应的位置 $(\boldsymbol{x}(t_0), t_0)\in U$，$\forall t>t_0$，系统 $\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{\psi}(\boldsymbol{x}, t)$ 的轨迹满足 $(\boldsymbol{x}(t), t)\in U$。

命题2 此处依赖假设1～3确保路径光滑且轨迹远离奇点，引理4～7支撑Lyapunov导数化简与收敛性结论。挖掘机系统齿尖运动轨迹指令 $\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{\psi}(\boldsymbol{x}, t)$ 收敛到 $C(t)$。

证明：构造Lyapunov函数 $P=D^2/2$。给定齿尖轨迹指令 $\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{\psi}(\boldsymbol{x}, t)$，基于链式法则，$P(\boldsymbol{x}(t), t)$ 的时间导数为 $\dot{P}=\frac{\partial P}{\partial \boldsymbol{x}}\frac{\partial \boldsymbol{x}}{\partial t}+\frac{\partial P}{\partial t}=\nabla P^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\psi}+\frac{\partial P}{\partial t}$。代入向量场式(19)可得

$$\dot{P}=-\eta G\nabla P^{\mathrm{T}}\nabla D+\eta H\nabla P^{\mathrm{T}}\boldsymbol{T}^*-\nabla P^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Pi}_T\frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t}+\frac{\partial P}{\partial t} \tag{31}$$

基于引理2中的式(18)，$\nabla P^{\mathrm{T}}\boldsymbol{T}^*=\boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{T}^*=0$。进而由引理4可知式(31)最后两项相互抵消，基于链式求导，$\nabla P^{\mathrm{T}}\nabla D=D\nabla D^{\mathrm{T}}\nabla D=D$，整理可得

$$\dot{P}=-\eta GD \tag{32}$$

链式法则给出$\dot{P}=D\dot{D}$，代入上式可得$\dot{D}=-\eta G$，由引理6可知$\eta>v_r-v_m>0$。

根据引理7，将Lyapunov函数的导数与挖掘机齿尖与目标路径之间的距离变化率联系起来，并利用比例因子的下界推导出距离函数具有单调递减的性质。由此可得，对于挖掘机齿尖与目标路径之间的任何初始距离，在归一化时变向量场的引导下，该距离将单调递减至零。这一过程保证了挖掘机在向量场控制下的收敛性。

2.3　鲁棒性分析

前文已经证明在理想情况下挖掘机齿尖基于轨迹指令$\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{\psi}(\boldsymbol{x},t)$在任意初始位置$(\boldsymbol{x}(t),t)\in U$收敛到目标路径$C(t)$。考虑上文的运动学模型，通过逆向运动学求解关节的速度指令$\dot{\boldsymbol{q}}_d=\boldsymbol{\psi}_q(\boldsymbol{x},t)$，$\boldsymbol{q}_d=(q_{d1},q_{d2},q_{d3})$，底层控制器控制关节角度轨迹最终收敛到围绕指令轨迹$c(t)=(c_1(t),c_2(t),c_3(t))$的不变集；同时，由上文的运动学模型和液压系统模型可知，系统的未建模误差和未知扰动对控制性能产生影响。

系统关节扰动为$\boldsymbol{\delta}_q=(\delta_{q_1},\delta_{q_2},\delta_{q_3})$，则实际关节速度$\dot{\boldsymbol{q}}=\boldsymbol{\psi}_q(\boldsymbol{x},t)+\boldsymbol{\delta}_q$，$\boldsymbol{q}=(q_1,q_2,q_3)$。通过上文的关节空间与位置空间的雅可比矩阵$J(\boldsymbol{q})$映射实际齿尖速度为$\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{\psi}(\boldsymbol{x},t)+\boldsymbol{\delta}$。

本节通过Lyapunov理论证明，在存在有界扰动$\boldsymbol{\delta}$，$\|\boldsymbol{\delta}\|\leqslant\varpi$的情况下，挖掘机齿尖实时位置与作业路径的标量距离函数$D(\boldsymbol{x},t)$在有限时间内保持收敛。

假设5　时变路径下，要求扰动$\varpi<v_r-v_m$。

命题3　基于假设5的扰动界限，结合引理3和引理6导出不变集。给定挖掘机齿尖任意初始时刻对应的位置$(\boldsymbol{x}(t_0),t_0)\in U$，在控制律$\boldsymbol{u}=\boldsymbol{\psi}(\boldsymbol{x},t)$下，扰动系统$\dot{\boldsymbol{x}}(t)=\boldsymbol{u}+\boldsymbol{\delta}$的轨迹收敛到以下正不变集：

$$\Gamma(t)=\{D(\boldsymbol{x},t)<G^{-1}(\frac{\delta}{v_r-v_m})\}\tag{33}$$

证明：系统受到未建模误差和未知扰动影响时，Lyapunov函数P的时间导数变为

$$\dot{P}=\nabla P^{\mathrm{T}}\dot{\boldsymbol{x}}+\frac{\partial P}{\partial t}=\nabla P^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\psi}+\nabla P^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\delta}+\frac{\partial P}{\partial t}\tag{34}$$

按照命题2的步骤，得到$\dot{P}=-\eta GD+\nabla P^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\delta}_u$。设$M=\max\|\boldsymbol{\delta}_u\|$，那么，已知$\dot{P}=D\dot{D}$，有

$$\dot{D}<-\eta G+M<-\eta G+\varpi\tag{35}$$

由定义5可知当且仅当$a>G^{-1}(b)$时，有$G(a)>b$。因此，在满足命题3的条件下，当$D\geqslant G^{-1}(\frac{\delta}{v_r-v_m})$时，有

$$G\geqslant\frac{\delta}{v_r-v_m}\geqslant\frac{\delta}{\eta}\tag{36}$$

$$\dot{D}<-\delta+M<0\tag{37}$$

齿尖轨迹收敛的正不变集如图5所示。在鲁棒性分析中，命题3证明了系统在干扰下的最终有界性。由上式可知，距离函数的最小衰减速度（时间导数最大值）为$-\delta+\max\|\delta_u\|<0$，给定初始时刻$t_0$，初始距离函数$D_0$，可知收敛时间为

$$T(D_0,t_0)=t_0+\frac{D_0}{\delta-\max\|\boldsymbol{\delta}_u\|}\tag{38}$$

因此，当$t>T(D_0,t_0)$时，有$\boldsymbol{x}(t)\in\Gamma(t)$。

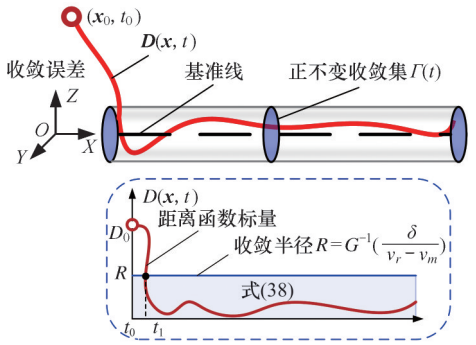


图5　齿尖轨迹收敛的正不变集

Fig.5　Positive invariant set of bucket tip trajectory convergence

注8：$\Gamma(t)$是系统在干扰下的“稳定盆地”，所有轨迹最终都会被吸入该区域。距离函数$D(\boldsymbol{x},t)$的各向同性特性确保机器人在任何方向偏离曲线时，都能以相同强度的控制输入纠正偏差；由于所有方向上的距离误差被同等抑制，导致不变集$\Gamma(t)$是一个围绕曲线$C(t)$的管状邻域，截面为圆形，半径由命题3给出。综上，无干扰时，系统渐近收敛到目标路径$C(t)$；有干扰时，则收敛到正不变集$\Gamma(t)$。

2.4　奇异点可达性分析

奇异点指在向量场中无法唯一确定导航方向的位置。具体来说，当挖掘机齿尖处于某些特殊位置时，目标路径上存在多个等距的最近点，导致向量场无法生成唯一的速度指令。本节提出了一种奇异点规避机制，通过选择特定收敛项参数G，挖掘机齿尖仍能稳定地收敛到目标路径。

定义7　存在时不变目标路径C，对于任意点$\boldsymbol{x}\in\mathbf{R}^n$，定义其最近点投影映射为

$$\boldsymbol{x}^*(\boldsymbol{x},t)=\arg\min_{\boldsymbol{y}\in C}\|\boldsymbol{x}-\boldsymbol{y}\|\tag{39}$$

其中，$\boldsymbol{y}$是目标路径C上的任意点。若存在点$\boldsymbol{x}_p$使投影映射$\boldsymbol{x}^*(\boldsymbol{x}_p)$包含多个元素（即存在多个最近点），则称$\boldsymbol{x}_p$为奇异点，记为$\boldsymbol{x}_p\notin U$。

定义8　奇异点$\boldsymbol{x}_p$沿方向$\boldsymbol{d}$可达的充要条件为：存在轨迹$\boldsymbol{x}(t)$及有限时间t_p，满足

$$\lim_{t\to t_p^-}\dot{\boldsymbol{x}}(t)=\boldsymbol{d}\qquad \|\boldsymbol{d}\|=1\qquad \boldsymbol{x}(t_p)=\boldsymbol{x}_p\notin U$$

定义9 对任意奇异点$\boldsymbol{x}_p$，设其关联的最近点集合为$\boldsymbol{x}^*(\boldsymbol{x}_p)=\{\boldsymbol{y}_1,\boldsymbol{y}_2,\cdots,\boldsymbol{y}_n\}$，定义函数

$$\Phi(\boldsymbol{x}_p,\boldsymbol{y}_i)=\min_{\boldsymbol{y}_j\neq\boldsymbol{y}_i}\frac{2D(\boldsymbol{x}_p)\left|(\boldsymbol{y}_j-\boldsymbol{y}_i)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{T}^*(\boldsymbol{y})\right|}{\left\|\boldsymbol{y}_j-\boldsymbol{y}_i\right\|^2}\tag{40}$$

其中，分子量化从$\boldsymbol{y}_i$到相邻投影点$\boldsymbol{y}_j$的切向偏移量；分母通过归一化几何距离，消除尺度的影响；$\Phi(\boldsymbol{x}_p,\boldsymbol{y}_i)$反映轨迹从$\boldsymbol{y}_i$偏离至$\boldsymbol{y}_j$的最小“代价”，值域满足$0<\Phi(\boldsymbol{x}_p,\boldsymbol{y}_i)<\dfrac{2D(\boldsymbol{x}_p)}{\min\|\boldsymbol{y}_j-\boldsymbol{y}_i\|}$。

引理8 若沿方向$\boldsymbol{d}=\boldsymbol{\psi}(\boldsymbol{x}_p,\boldsymbol{y}_i)$趋近奇异点$\boldsymbol{x}_p$，且满足

$$\frac{\hat{G}(\boldsymbol{x}_p)}{\hat{H}(\boldsymbol{x}_p)}>\Phi(\boldsymbol{x}_p,\boldsymbol{y}_i)\tag{41}$$

此时，轨迹在$\boldsymbol{x}_p$邻域内无法维持与$\boldsymbol{y}_i$的投影关系；轨迹在趋近奇异点的过程中矢量场切换至另一投影点$\boldsymbol{y}_j$，对应的方向向量突变为$\boldsymbol{\psi}(\boldsymbol{x}_p,\boldsymbol{y}_j)\neq\boldsymbol{d}$。详细证明过程见篇首二维码中附录1。

定义全局约束函数$K(\boldsymbol{x}_p)=\max\limits_{\boldsymbol{y}_i\in\boldsymbol{x}_p^*}\Phi(\boldsymbol{x}_p,\boldsymbol{y}_i)$，若对所有奇异点$\boldsymbol{x}_p$满足$\hat{G}/\hat{H}>K(\boldsymbol{x}_p)$，则系统轨迹无法以任何方向趋近奇异点，即$\boldsymbol{x}_p$不可达。由定义6可知$\hat{G}^2+\hat{H}^2\equiv1$，对于任何$\boldsymbol{x}_p$，都有$\hat{G}(\boldsymbol{x}_p)>K(\boldsymbol{x}_p)/\sqrt{K(\boldsymbol{x}_p)^2+1}$。

注9：当参数设计未能满足奇异点不可达条件$\hat{G}(\boldsymbol{x}_p)>K(\boldsymbol{x}_p)/\sqrt{K(\boldsymbol{x}_p)^2+1}$时，系统可能短暂进入奇异点邻域。为了解决投影不唯一的问题，系统采取动态投影选择策略，记录轨迹上一时刻的投影点$\boldsymbol{y}_{\mathrm{prev}}$，在当前投影不唯一时，选择与$\boldsymbol{y}_{\mathrm{prev}}$欧氏距离最近的投影点$\boldsymbol{y}_i\in\boldsymbol{x}^*(\boldsymbol{x})$作为有效投影。基于时间连续性的假设，认为当前的投影点应该与前一时刻的投影在几何位置上具有邻近关系。这种假设有助于避免由投影跳变引起的指令突变。另外，即使轨迹短暂偏离至奇异点邻域，基于上文的鲁棒性分析，系统具备自恢复能力，短暂偏离后无需人工干预即可回归稳定跟踪状态。算法1的具体实现如下(算法的有效性验证见第4节和篇首二维码中附录2)。

算法1 考虑奇异点的向量场算法实现

输入：挖掘机齿尖初始位置$\boldsymbol{x}_p$；目标路径$C=\boldsymbol{r}(s,t)$；函数$G(D)$；上一时刻投影点$\boldsymbol{y}_{\mathrm{prev}}$

1. 根据式(8)求解优化问题，获取所有候选投影点集合$\boldsymbol{x}^*(\boldsymbol{x}_p)=\{\boldsymbol{y}_1,\boldsymbol{y}_2,\cdots,\boldsymbol{y}_n\}$；
2. 判断是否为奇异点：
  如果$\boldsymbol{x}^*$中有多个投影点，是奇异点；
    3. 计算$\Phi(\boldsymbol{x}_p,\boldsymbol{y}_i)$，取所有投影点最大值：
      对于$\boldsymbol{y}_i\in\boldsymbol{x}^*$，有$K(\boldsymbol{x}_p)=\max\limits_{\boldsymbol{y}_i\in\boldsymbol{x}_p^*}\Phi(\boldsymbol{x}_p,\boldsymbol{y}_i)$；
    4. 验证奇异点不可达条件：
    如果$\hat{G}/\hat{H}>K(\boldsymbol{x}_p)$
    奇异点不可达，自动选择与上一时刻最接近的最小距离投影点$\boldsymbol{y}_{\mathrm{curr}}$；
      当$\hat{G}/\hat{H}\leqslant K(\boldsymbol{x}_p)$时：
      动态调整收敛因子k_f，满足$\hat{G}/\hat{H}>K(\boldsymbol{x}_p)$，
      预设$k_{f,\max}$，要求$k_f\leqslant k_{f,\max}$；
    否则 奇异点可达，强制选择有效投影点$\boldsymbol{y}_{\mathrm{curr}}$；
    5. 根据式(27)计算向量场控制信号；
  否则 非奇异点：
  根据式(27)计算向量场控制信号；
6. 更新上一时刻的投影点：$\boldsymbol{y}_{\mathrm{prev}}=\boldsymbol{y}_{\mathrm{curr}}$；
7. 返回 返回当前投影点$\boldsymbol{y}_{\mathrm{curr}}$和控制向量$\boldsymbol{\psi}$。

3 下层控制器设计

本节建立了挖掘机系统的电液流量匹配耦合控制模型，并基于图2所示的阀口独立液压系统，设计了一种进油流量与出油压力协同调节的控制策略。具体来说，基于向量场实时速度指令，进油阀口采用基于流量谱的计算流量控制器有效补偿阀口非线性特性，提高执行器跟踪精度；同时，设计压力控制器在保证运动特性稳定的前提下，基于指令压力信号动态调节回油阀口开度，有效减少回油压力损失。进油流量与回油压力协同调节控制框图见图6。

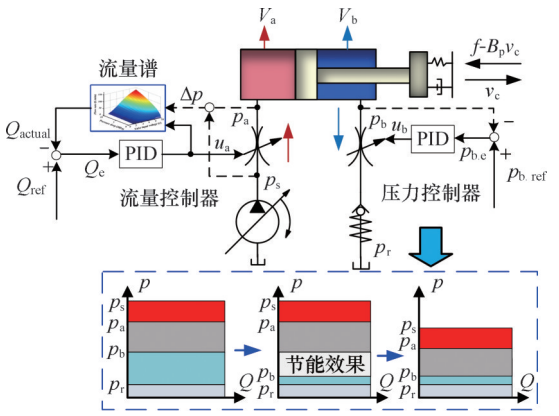


图6 进油流量与回油压力协同调节控制框图

Fig.6 Synergistic regulation control block diagram of oil inlet flow and oil return pressure

设计基于流量谱的计算流量控制器：

$$\left.\begin{aligned}u_a&=K_pQ_e+K_I\int Q_e+K_D\frac{\mathrm{d}Q_e}{\mathrm{d}t}\\Q_e&=Q_{b,ref}-Q_{actual}\end{aligned}\right\}\tag{42}$$

式中：K_P、K_I、K_D为流量控制器增益；$Q_{b,ref}$为指令流量；Q_{actual}为实际流量；Q_e为误差。

基于压力反馈的计算流量公式为

$$Q_{actual}=C_dA_2(u_b)\sqrt{2\Delta p_2/\rho}\tag{43}$$

式中：A_2为回油阀口过流面积；Δp_2为阀口压差；C_d为流量系数；ρ为液体密度。

设计压力控制器：

$$\left.\begin{aligned} u_b &= K_p p_e + K_I \int p_e + K_d \frac{\mathrm{d}p_e}{\mathrm{d}t} \\ p_e &= p_{b,ref} - p_b \end{aligned}\right\} \tag{44}$$

式中：K_P、K_I、K_D为压力控制器增益；$p_{b,ref}$为指令压力；p_b为实际压力；p_e为误差。

4　仿真验证

根据第1节系统模型的描述，构建了挖掘机机械-电液伺服系统的物理仿真模型。进一步，为验证本文算法的有效性，设计了两条不同的目标路径，以展示挖掘机复杂动态环境中的路径跟踪能力。

4.1　时变扰动下方形路径自主作业验证

通过分段参数化函数$C_F(s)$来描述方形路径：

$$C_F(s)=\begin{cases} T_2+\dfrac{s}{L_s}(T_1-T_2) & 0\leqslant s<L_s \\ O_1+r\begin{bmatrix}\cos\left(\dfrac{\pi}{2}-\dfrac{s-L_s}{L_a}\cdot\dfrac{\pi}{2}\right)\\ \sin\left(\dfrac{\pi}{2}-\dfrac{s-L_s}{L_a}\cdot\dfrac{\pi}{2}\right)\end{bmatrix} & L_s\leqslant s<L_s+L_a \\ T_1+\dfrac{s-L_s-L_a}{L_s}(T_4-T_1) & L_s+L_a\leqslant s<2L_s+L_a \\ O_4+r\begin{bmatrix}\cos\left(-\dfrac{s-(2L_s+L_a)}{L_a}\cdot\dfrac{\pi}{2}\right)\\ \sin\left(-\dfrac{s-(2L_s+L_a)}{L_a}\cdot\dfrac{\pi}{2}\right)\end{bmatrix} & 2L_s+L_a\leqslant s<2L_s+2L_a \\ T_4+\dfrac{s-2L_s-2L_a}{L_s}(T_3-T_4) & 2L_s+2L_a\leqslant s<3L_s+2L_a \\ O_3+r\begin{bmatrix}\cos\left(\dfrac{3\pi}{2}-\dfrac{s-(3L_s+2L_a)}{L_a}\cdot\dfrac{\pi}{2}\right)\\ \sin\left(\dfrac{3\pi}{2}-\dfrac{s-(3L_s+2L_a)}{L_a}\cdot\dfrac{\pi}{2}\right)\end{bmatrix} & 3L_s+2L_a\leqslant s<3L_s+3L_a \\ T_3+\dfrac{s-3L_s-3L_a}{L_s}(T_2-T_3) & 3L_s+3L_a\leqslant s<4L_s+3L_a \\ O_2+r\begin{bmatrix}\cos\left(\pi-\dfrac{s-(4L_s+3L_a)}{L_a}\cdot\dfrac{\pi}{2}\right)\\ \sin\left(\pi-\dfrac{s-(4L_s+3L_a)}{L_a}\cdot\dfrac{\pi}{2}\right)\end{bmatrix} & 4L_s+3L_a\leqslant s<4L_s+4L_a \end{cases}$$

式中：L_s为直段的长度；L_a为圆弧段的长度；r为圆角的半径；O_1、O_2、O_3、O_4为四个圆弧的圆心坐标；T_1、T_2、T_3、T_4为方形轨迹四个顶点。

参数初始值设置见表1。给定挖掘机一个初始姿态并记录齿尖在作业空间的初始位置，齿尖在向量场的引导下沿预设方形路径实现自主作业，如图7所示。

表1　参数初始值设置

Tab.1　Parameter initial value settings

动臂关节/(°)	10	齿尖速度/(m·s^{-1})	0.3
斗杆关节角/(°)	−40	收敛增益k_f	20.5
铲斗关节角/(°)	−30	离散采样点数	1000
固定铰接点	(0,0)	$G(D)$	定义5
轨迹中心	(2.8,−0.7)	$H(D)$	定义6
正方形边长/m	0.8	流量控制器	(180,15,0)
倒角半径/m	0.8/7	压力控制器	(120,10,0)

由于挖掘机沿预设方形路径自主作业过程中齿尖作业精度会受到模型不确定性、系统非线性及土壤阻力等因素的影响，故本文将扰动模拟信号

$$F_x = 0.02\sin(1+5t)+0.02\sin(2t)$$
$$F_y = 0.02\cos(1+4t)+0.01\sin(t)$$

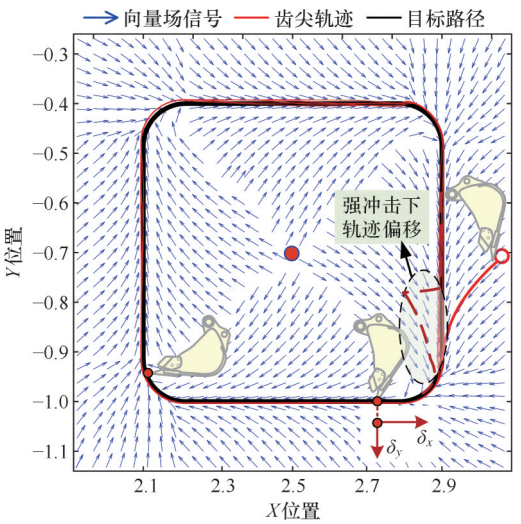


图7　向量场引导下的方形目标路径跟踪挖掘

Fig.7　Square target path tracking mining under the guidance of vector field

作用在挖掘机齿尖，如图8所示，以验证使用本文方法时挖掘机在时变干扰下自主作业的鲁棒性（命题3）。

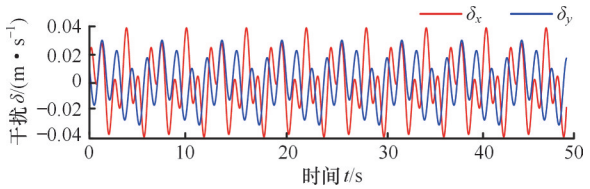


图8 正常挖掘过程齿尖干扰信号模拟

Fig.8 Bucket tip interference signal simulation in normal digging process

基于时变向量场在线规划出时变干扰下挖掘机齿尖速度指令，基于运动学实时反解出动臂斗杆液压缸的指令速度。可以看出，由于存在扰动，向量场控制器实施规划的速度指令需要对干扰造成的速度偏差进行实时修正，此时，基于底层控制器中的计算流量控制器对指令速度信号进行精准跟随，如图9所示。跟踪误差如图10所示，动臂液压缸、斗杆液压缸速度的跟踪误差分别被约束在5%、2%以内，满足精度指标要求。

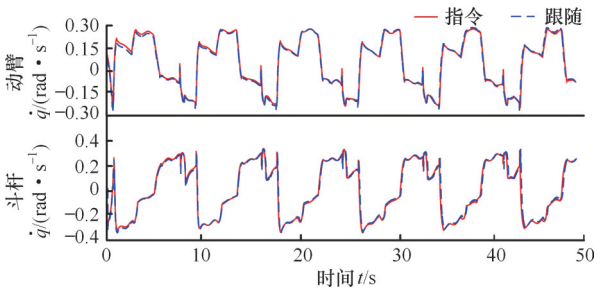


图9 动臂斗杆角速度指令跟踪（方形目标路径）

Fig.9 Boom and arm angular velocity command tracking（square target path）

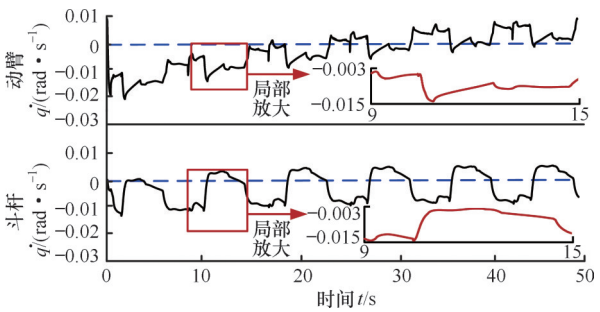


图10 动臂斗杆角速度指令跟踪误差（方形目标路径）

Fig.10 Tracking error of boom and arm angular velocity command（square target path）

本文提出的是一种在线控制器，通过跟踪向量场控制器实时规划的速度指令，实时采集动臂斗杆关节角度，基于运动学正向求解铲斗齿尖的实时位置，如图11所示，将采集到的最新位置输入向量场控制器，基于算法1规划下一个步长的速度指令。

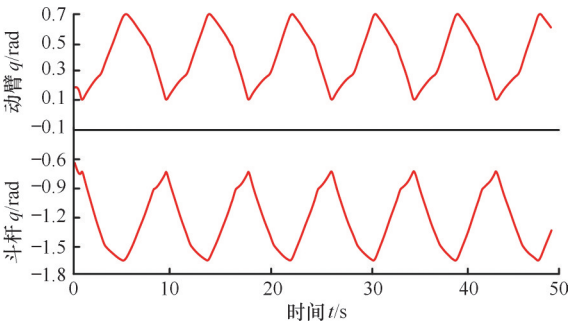


图11 动臂斗杆关节角度（方形目标路径）

Fig.11 Joint angle of boom and arm（square target path）

由式(35)可知，收敛集$\Gamma(t)$的收敛半径为$D(\boldsymbol{x},t)\leqslant 0.038$ m，此时挖掘机齿尖实时位置与目标路径之间的距离函数变化如图12所示。

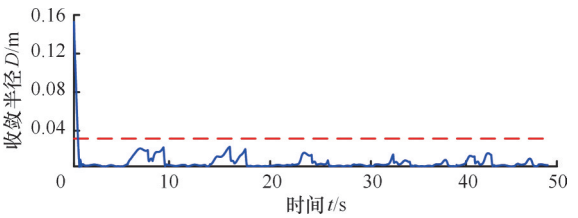


图12 距离函数变化值（方形目标路径）

Fig.12 Change value of distance function（square target path）

基于底层控制器中的压力控制器对液压缸回油压力进行约束，在整个作业周期，系统回油压力都被控制在较低的范围内，如图13所示，有效减小了回油阀口节流造成的压力损失，提高了能源利用效率。

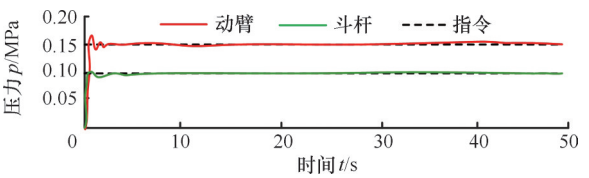


图13 动臂斗杆液压缸回油腔压力指令跟踪

Fig.13 Pressure command tracking of boom and arm hydraulic cylinder return-oil chamber

注 10：为验证本文方法在挖掘机受到强冲击而造成轨迹偏移、失稳情况下的自恢复能力（命题2）。在35 s处开始，引入时长0.075 s、大小为2 m/s的强冲击信号，信号作用期间内，挖掘机齿尖作业轨迹发生偏离，如图7中绿色标注位置；冲击信号作用结束后，向量场控制器检测此时位置并重新规划指令，实现挖掘机自主作业的自恢复，动臂斗杆关节角度变化如图14所示，齿尖与目标路径之间的距离函数变化如图15所示。

4.2 时变圆形目标路径自主作业验证

给定挖掘机一个初始姿态并记录齿尖在作业空间的初始位置，如图16所示。可以看到，针对

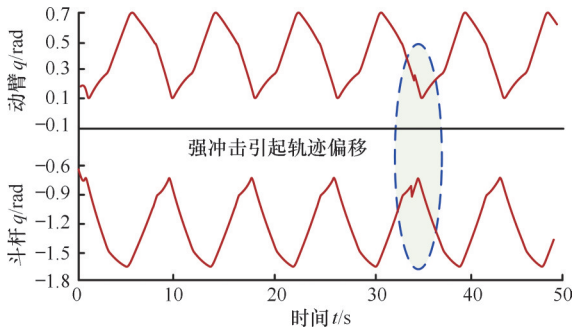


图 14　强冲击下动臂斗杆关节角度

Fig.14　Joint angle of boom and arm under strong impact

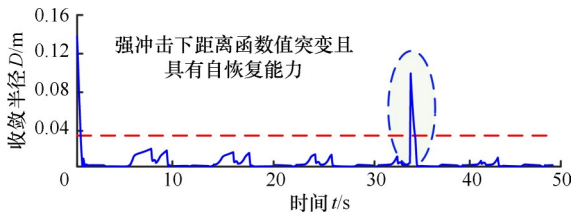


图 15　强冲击下距离函数变化值

Fig.15　Change value of distance function under strong impact

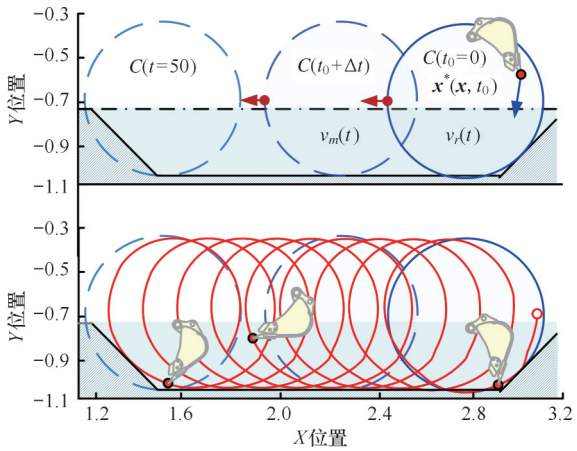


图 16　向量场引导下的时变圆形目标路径跟踪挖掘

Fig.16　Time-varying circular target path tracking mining guided by vector field

长距离沟槽等大尺度作业区域，单一固定路径往往无法覆盖完整作业面，需采取分段式轨迹规划策略。然而，分段作业模式存在显著局限性：每次分段作业后需重新进行环境感知、路径生成与轨迹优化，导致作业连续性中断且计算资源重复消耗。

本文提出的路径跟踪方法通过引入时变向量场动态引导机制，实现了路径参数的在线自适应性调整。所提方法的优势如下：①时变向量场将时间维度融入路径描述，使挖掘轨迹能够根据作业进度自主演化，实现连续挖掘以覆盖路径；②无需中断作业进行重新规划，通过向量场的参数时变特性引导齿尖跟踪预设相位递进的目标作业路径，有效解决了大范围作业场景中重复规划导致的效率损耗问题，使系统在仅需初始参数配置的情况下即可完成复杂作业面的完整覆盖。

参数初始值设置见表 2。通过定义时变参数化函数 $C_Y(s,t)$ 来描述本节的时变圆形目标路径：

$$C_Y(s,t)=\begin{bmatrix}x(s,t)\\y(s,t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}r\cdot\cos(s)+(X_0+v(t)\cdot t)\\r\cdot\sin(s)+Y_0\end{bmatrix}$$

式中：r 为圆形路径半径；$v(t)$ 为路径的水平时变速度；(X_0, Y_0) 为路径 $C_Y(s,0)$ 的圆心坐标。

表 2　参数初始值设置

Tab.2　Parameter initial value settings

动臂关节角/(°)	20	齿尖速度/(m·s^{-1})	0.3
斗杆关节角/(°)	−45	收敛增益 k_f	18
铲斗关节角/(°)	−30	离散采样点数	2000
固定铰接点	(0,0)	$G(D)$	定义 5
轨迹中心	(2.8,−0.7)	$H(D)$	定义 6
圆形半径/m	0.3	流量控制器	(150,21,0)
路径时变速度/(m·s^{-1})	0.025	压力控制器	(115,18,0)

同 4.1 节，基于流量控制器跟随时变向量场在线规划出的动臂斗杆液压缸的指令速度如图 17 所示，跟踪误差如图 18 所示，动臂液压缸速度的跟踪误差被约束在 7% 以内，且 5 s 后跟踪误差被约束在 4% 以内；斗杆液压缸速度的跟踪误差被约束在 3% 以内，满足精度指标要求。

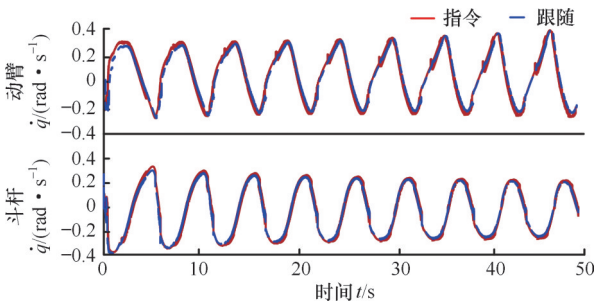


图 17　动臂斗杆角速度指令跟踪(圆形目标路径)

Fig.17　Boom and arm angular velocity command tracking(circular target path)

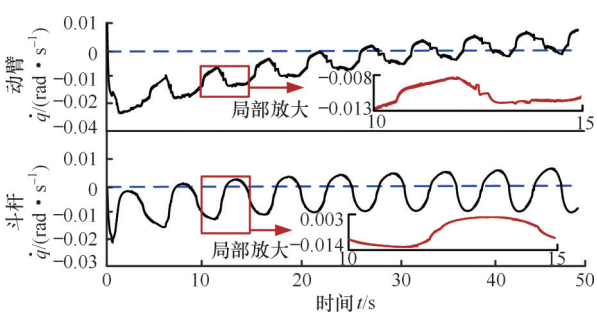


图 18　动臂斗杆角速度指令跟踪误差(圆形目标路径)

Fig.18　Tracking error of boom and arm angular velocity command(circular target path)

挖掘机在跟随时变圆形目标路径实现自主作业过程中，动臂斗杆关节的角度变化如图19所示；由式(35)可知，收敛集$\Gamma(t)$的收敛半径$D(x,t)\leqslant 0.029$ m，齿尖与目标路径之间的距离函数变化如图20所示。

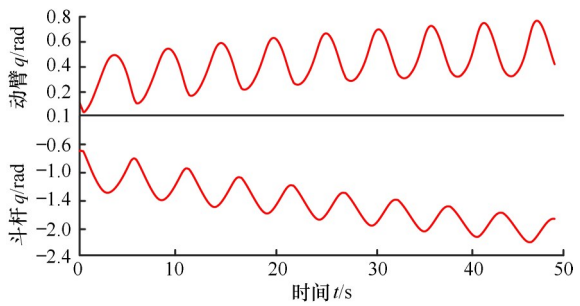


图19 动臂斗杆关节角度(圆形目标路径)

Fig.19 Joint angle of boom and arm

(circular target path)

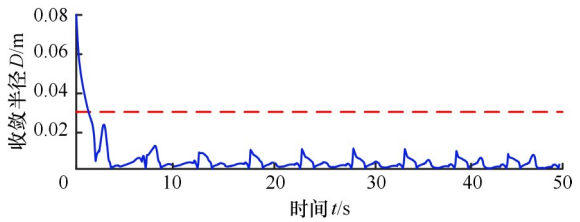


图20 距离函数变化值(圆形目标路径)

Fig. 20 Change value of distance function

(circular target path)

为补偿圆形路径时变运动，设计时间前馈补偿项，根据距离函数和式(28)计算其范数值，如图21所示。

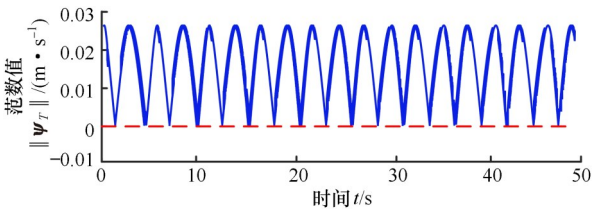


图21 时间前馈补偿项范数值

Fig.21 Time feedforward compensation term value

5 结语

本文提出了一种基于时变GVF的分层控制架构，实现挖掘机自主作业过程中的高精度、高能效动态路径跟踪与扰动抑制。理论分析表明，通过参数化曲线构建的归一化时变矢量场作为上层规划器，结合动态前馈补偿与零空间投影机制，能够有效补偿时变路径几何形变对机械臂运动的影响。基于Lyapunov稳定性理论证明了系统在模型不确定性及外部扰动下的最终有界性，量化了扰动强度与齿尖轨迹偏差的解析关系，此外，提出奇异点规避机制，如算法1所示，基于附录2中复杂曲线验证其有效性。下层控制器针对阀口独立液压系统设计的进油流量-回油压力协同调节策略，保证对于规划器指令的跟踪精度，同时降低了回油阀口节流损失，提高了系统能效。仿真结果表明，所提方法在方形与时变圆形路径跟踪过程中，动臂和斗杆液压缸速度跟踪误差均低于5%，铲斗齿尖的距离函数始终收敛到正不变集，且在强冲击扰动导致路径偏移时具有有限时间自恢复能力。

参考文献：

[1] 陈俊翔，姜宏达，孔祥东，等. 考虑时滞因素的负载口独立系统模式切换平稳性研究[J]. 中国机械工程，2025，36(3)：414-425.
CHEN Junxiang，JIANG Hongda，KONG Xiangdong，et al. Research on Smoothness of Mode Switch of Independent Metering Systems Considering Time-delay Factors [J]. China Mechanical Engineering，2025，36(3)：414-425.

[2] 丁孺琦，熊文杰，程敏，等. 智能化阀口独立电液控制系统安全性能评估[J]. 机械工程学报，2024，60(4)：101-112.
DING Ruqi，XIONG Wenjie，CHENG Min，et al. Safety Performance Evaluation of the Intelligent Independent-metering Electro-hydraulic Control System[J]. Journal of Mechanical Engineering，2024，60(4)：101-112.

[3] GONCALVES V M，PIMENTA L C A，MAIA C A，et al. Vector Fields for Robot Navigation along Time-varying Curves in n -dimensions[J]. IEEE Transactions on Robotics，2010，26(4)：647-659.

[4] REZENDE A M C，GONÇALVES V M，RAFFO G V，et al. Robust Fixed-wing UAV Guidance with Circulating Artificial Vector Fields[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Madrid，2019：5892-5899.

[5] ZHOU Yu，BAUTISTA J，YAO Weijia，et al. Inverse Kinematics on Guiding Vector Fields for Robot Path Following[C]//2025 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Atlanta，2025：8635-8641.

[6] ZHU P，ZHOU Z，YAO W，et al. HI-GVF：Shared Control based on Human-influenced Guiding Vector Fields for Human-multi-robot Cooperation[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Atlanta，2025：10.48550/arXiv.2502.11370.

[7] HU Binbin，ZHANG Haitao，YAO Weijia，et al. Spontaneous-ordering Platoon Control for Multirobot Path Navigation Using Guiding Vector Fields[C]//IEEE Transactions on Robotics. IEEE，2023：2654-2668.

[8] LAWRENCE D，FREW E，PISANO W. Lyapunov Vector Fields for Autonomous UAV Flight Control[C]//AIAA Guidance，Navigation and Control Conference and Exhibit. Hilton Head，2007：AIAA2007-6317.

[9] REZENDE A M C，GONCALVES V M，PIMENTA L C A. Constructive Time-varying Vector Fields for Robot Navigation[J]. IEEE Transactions on Robotics，2022，38(2)：852-867.

[10] LIANG Yueqian，JIA Yingmin，DU Junping，et al. Vector Field Guidance for Three-dimensional Curved Path Following with Fixed-wing UAVs[C]//2015 American Control Conference (ACC). Chicago，2015：1187-1192.

[11] LU Yang, LUO Sha, ZHU Pengming, et al. Versatile Distributed Maneuvering with Generalized Formations Using Guiding Vector Fields[C]//2025 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Atlanta, 2025: 11370-11376.

[12] HU Binbin, YAO Weijia, ZHOU Yanxin, et al. Concurrent-allocation Task Execution for Multirobot Path-crossing-minimal Navigation in Obstacle Environments [C]//IEEE Transactions on Robotics. IEEE, 2025: 6287-6306.

[13] YAO Weijia, de MARINA H G, LIN Bohuan, et al. Singularity-free Guiding Vector Field for Robot Navigation [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2021, 37(4): 1206-1221.

[14] AGUIAR A P, HESPANHA J P, KOKOTOVIĆ P V. Performance Limitations in Reference Tracking and Path Following for Nonlinear Systems[J]. Automatica, 2008, 44(3): 598-610.

[15] BAUTISTA J, ACUAVIVA A, HINOJOSA J, et al. Fully Distributed and Resilient Source Seeking for Robot Swarms[EB/OL]. 2024: arXiv: 2410.15921. https://arxiv.org/abs/2410.15921

[16] LU Yang, YAO Weijia, XIAO Yongqian, et al. Vector Field-guided Learning Predictive Control for Motion Planning of Mobile Robots with Uncertain Dynamics[EB/OL]. 2024: arXiv: 2405.08283. https://arxiv.org/abs/2405.08283

[17] HU Binbin, ZHANG Haitao, YAO Weijia, et al. Coordinated Guiding Vector Field Design for Ordering-flexible Multirobot Surface Navigation[C]//IEEE Transactions on Automatic Control. IEEE, 2024: 4805-4812.

[18] NAJAFI M, ROSSA C, ADAMS K, et al. Using Potential Field Function with a Velocity Field Controller to Learn and Reproduce the Therapist's Assistance in Robot-assisted Rehabilitation[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2020, 25(3): 1622-1633.

[19] TREADWAY E, GILLESPIE R B. Vector Field Control Methods for Discretely Variable Passive Robotic Devices [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2021, 37(2): 375-389.

[20] 刘永钦. 基于速度场算法的模切机控制系统设计[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2018.
LIU Yongqin. Design of Die-cutting Machine Control System Based on Velocity Field[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.

[21] 李兵. 基于方向场理论的X-Y平台速度规划与轮廓控制研究[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2013.
LI Bing. Research on Velocity Planning and Contour Control of X-Y Platform Based on Directional Field Theory [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2013.

[22] KIM K, KIM M, KIM D, et al. Modeling and Velocity-field Control of Autonomous Excavator with Main Control Valve[J]. Automatica, 2019, 104: 67-81.

[23] HE Xiaodong, LI Zhongkui. Full-state Planning of Nonholonomic Mobile Robots *via* Dynamic Velocity Vector Fields[C]//2023 35th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Yichang, 2023: 1495-1500.

[24] FREW E W, LAWRENCE D. Tracking Dynamic Star Curves Using Guidance Vector Fields[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2017, 40(6): 1488-1495.

[25] GONÇALVES V M, ADORNO B V, CROSNIER A, et al. Stable-by-design Kinematic Control Based on Optimization[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2020, 36(3): 644-656.

[26] TAN X, WEI W, LIU C, et al. Reinforcement Learning-based Trajectory Planning for Continuous Digging of Excavator Working Devices in Trenching Tasks[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2025, 40(13): 1847-1870.

[27] YAO Zongwei, ZHAO Shichao, TAN Xiaodan, et al. Real-time Task-oriented Continuous Digging Trajectory Planning for Excavator Arms[J]. Automation in Construction, 2023, 152: 104916.

[28] REZENDE A M C, GONÇALVES V M, NUNES A H D, et al. Robust Quadcopter Control with Artificial Vector Fields[C]//2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2020: 6381-6387.

[29] REZENDE A M C, JÚNIOR G P C, FERNANDES R, et al. Indoor Localization and Navigation Control Strategies for a Mobile Robot Designed to Inspect Confined Environments[C]//2020 IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). IEEE, 2020: 1427-1433.

[30] OLAVO J L G, THUMS G D, JESUS T A, et al. Robust Guidance Strategy for Target Circulation by Controlled UAV[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2018, 54(3): 1415-1431.

[31] MINAV T A, LAURILA L I E, PYRHÖNEN J J. Analysis of Electro-hydraulic Lifting System's Energy Efficiency with Direct Electric Drive Pump Control[J]. Automation in Construction, 2013, 30: 144-150.

[32] 陈俊翔，齐钒羽，姜宏达，等. 负载口独立双阀芯电液阀的结构优化[J]. 中国机械工程，2024，35(10)：1747-1761.
CHEN Junxiang, QI Fanyu, JIANG Hongda, et al. Structure Optimization of Load Port Independent Double Spool Electro-hydraulic Valves[J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(10): 1747-1761.

[33] DING Ruqi, XU Bing, ZHANG Junhui, et al. Bumpless Mode Switch of Independent Metering Fluid Power System for Mobile Machinery[J]. Automation in Construction, 2016, 68: 52-64.

[34] CHEN Junxiang, JIANG Hongda, KONG Xiangdong, et al. Mode Switching Control of Independent Metering Fluid Power Systems[J]. ISA Transactions, 2025, 158: 735-748.

[35] XU Bing, DING Ruqi, ZHANG Junhui, et al. Pump/Valves Coordinate Control of the Independent Metering System for Mobile Machinery[J]. Automation in Construction, 2015, 57: 98-111.

（编辑　陈　勇）

作者简介：姜宏达，男，2000年生，博士研究生。研究方向为液压机械臂运动控制。发表论文4篇。艾　超*（通信作者），男，1982年生，教授、博士研究生导师。研究方向为流体传动与控制等。出版专著3部，发表论文70余篇。E-mail：aichao@ysu.edu.cn。

本文引用格式：

姜宏达，陈俊翔，艾超，等. 基于时变引导向量场的阀口独立液压挖掘机路径跟踪控制[J]. 中国机械工程，2026，37(8)：1811-1823.

JIANG Hongda, CHEN Junxiang, AI Chao, et al. Time-varying Guidance Vector Field-based Path Following Control for Hydraulic Excavators with Independent Metering[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(8): 1811-1823.