

一种新颖的变系数速度场无源控制算法

张华强¹, 李泽¹, 刘永钦², 姚统²

(1. 哈尔滨工业大学(威海) 新能源学院, 山东 威海 264209;

2. 哈尔滨工业大学(威海) 信息科学与工程学院, 山东 威海 264209)

摘要: 传统速度场无源控制 X - Y 双轴联动系统, 在跟随多边形轨迹时拐角处存在导数不连续问题, 在跟随圆形轨迹时存在“轨径缩减”现象。提出了一种变系数速度场无源控制算法, 有效地解决了不同类型轨迹的连续平滑和轨径跟踪问题。实验结果表明, 该算法应用于奥运五环轮廓切割中, 跟随外缘长方形轨迹在拐角处无明显冲击, 跟随内缘圆形轨迹时无缩轨现象, 大大提高了轮廓切割精度, 控制算法可行且有效。

关键词: 速度场; 无源控制; 轨迹跟踪; 轮廓精度

中图分类号: TM33 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed19528

A Novel Passive Velocity Field Control Algorithm with Variable Coefficient

ZHANG Huaqiang¹, LI Ze¹, LIU Yongqin², YAO Tong²

(1. Department of New Energy, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, Shandong,

China; 2. Department of information science and Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, Shandong, China)

Abstract: The X - Y dual axis linkage system controlled by traditional passive velocity field control has the discontinue derivation at the corner of polygon and has the problem that called “path reduction” when following a circular trajectory. A passive velocity field control algorithm with variable coefficient was proposed, which effectively solves the problem of continuous smoothing and track tracking of different types of trajectories. The experiment results show that there is no obvious impact on the corner when follow the rectangle trajectory of the outer edge and there is no track shrinkage when follow the circular trajectory of the inner edge. The accuracy of contour cutting is greatly improved, and the control algorithm is feasible and effective.

Key words: velocity field; passive control; trace tracking; contour precision

速度场无源控制(passive velocity field control, PVFC)由文献[1]于1999年提出。随后, 文献[1]的作者又在文献[2]中通过数学推导, 分析了应用速度场无源控制算法闭环系统的收敛性和鲁棒性, 并将速度场无源控制应用于轮廓跟随并通过了仿真验证^[3]。速度场无源控制算法最初是为了控制机器人操纵器而设计的, 以使机器人关节角度的轨迹跟踪期望轨迹, 这就要求被控机械系统的惯性参数已知。文献[4]提出了自适应速度场无源控制, 将速度场无源控制算法扩展到机械系统惯性参数未知的领域。

速度场无源控制算法多用于操控机械臂轮廓控制。将该算法用于双足步行机器人控制获

得较好的效果^[5]; 用于脊柱微创手术机器人, 并成功完成了椎弓根螺钉植入操作^[6]。文献[7]提出了一种用于2D和3D轮廓跟踪的简单、快速、鲁棒性强的速度场无源控制方案。文献[8]将速度场算法应用于直线电机驱动的 X - Y 平台。文献[9]中通过仿真初步证明四旋翼飞行器能够在给定的速度场的作用下, 在保证闭环系统的无源性的前提下进行方位跟踪。

由于平滑的速度场无法实现各种各样的机器人任务, 针对速度场无源控制算法的缺陷, 文献[10]提出了由非平滑势函数的广义微分来产生不连续场, 获得了广泛认可。

本文在仿真过程中发现传统速度场无源控

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2017MEE053)

作者简介: 张华强(1967—), 男, 博士, 教授, Email: zhq@hit.edu.cn

制算法无法克服跟随多边形轨迹时拐角处不连续可导所导致的冲击过大问题。在跟随圆形轨迹时,传统速度场无源控制算法会有较大的“轨径缩减”现象。针对以上问题,本文提出了一种变系数的速度场无源控制算法,并应用在X-Y双轴联动切割平台,给出切割一个奥运五环旗帜的实验过程中的X-Y轴电机参数波形、位置波形和轮廓误差波形。奥运五环轮廓切割实验表明,跟随外缘长方形轨迹在拐角处无明显冲击,跟随内缘圆形轨迹时无缩轨现象,大大提高了轮廓切割精度,控制算法可行和有效。

1 速度场无源控制器

1.1 速度场定义

假设二维空间 $G = \{q\}$ 中点 q 处的切线空间为 $T_q G$, 则期望的速度场 V 可表示为映射:

$$V: G \rightarrow TG, q \rightarrow V(q) \in T_q G \quad (1)$$

如图1所示,设 q 为二维空间中任意一点, P_0 为期望轨迹 $g(x,y)=0$ 上距离点 q 最近的点,由 q 指向 P_0 的距离矢量定义为 d , P_0 处切线矢量为 v_t , q 点映射的速度矢量为

$$V(q) = V(q) = v_t + \lambda d \quad (2)$$

其中 $V(q) = [V_1(q) \ V_2(q)]^T$
式中: $V(q)$ 为 q 点映射的速度矢量; λ 为大于0的常数。

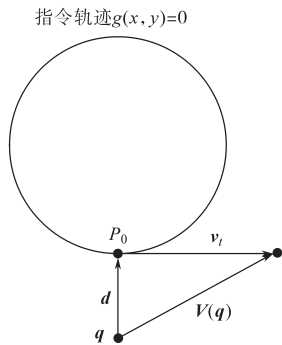


图1 q 点映射的速度矢量图

Fig.1 Speed vector of q

1.2 速度场无源控制器

将速度场无源控制用于X-Y双轴联动平台, X-Y双轴联动平台动力学模型如下式:

$$H(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} = \tau_c + \tau_e \quad (3)$$

其中 $\tau_c = [\tau_{c1} \ \tau_{c2}]^T$

$$\tau_e = [\tau_{e1} \ \tau_{e2}]^T$$

式中: $H(q)$ 为对称正定的惯性矩阵; $C(q,\dot{q})\dot{q}$ 项用来描述离心力和科里奥利力, $C(q,\dot{q})$ 为对称矩

阵; q 为关节位移; $\dot{q}$ 为关节速度; $\ddot{q}$ 为关节加速度; τ_c 为控制器输出的力矢量; τ_{c1}, τ_{c2} 为控制器输出的力矢量的2个分量; τ_e 为系统受到的外力矢量; τ_{e1}, τ_{e2} 为系统受到的外力矢量的2个分量。

为使应用了速度场算法的全新闭环系统具有无源性,需要构造一个虚拟轴来储存和释放能量。所构造的虚拟轴为

$$m_F \ddot{q}_F(t) = \tau_F(t) \quad (4)$$

式中: m_F 为虚拟轴的质量(单位: kg); $\ddot{q}_F(t)$ 为虚拟轴的加速度(单位: m/s^2); $\tau_F(t)$ 为虚拟轴受的轴向力(单位: N)。

我们称在原系统增加了一个虚拟轴之后的系统为增强系统。增强系统的动力学方程为

$$\bar{H}(\bar{q})\ddot{\bar{q}} + \bar{C}(\bar{q},\dot{\bar{q}})\dot{\bar{q}} = \bar{\tau}_c + \bar{\tau}_e \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{H}(\bar{q}) &= \begin{bmatrix} H(q) & \mathbf{0}_{2 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 2} & m_F \end{bmatrix} \\ \bar{C}(\bar{q},\dot{\bar{q}}) &= \begin{bmatrix} C(q,\dot{q}) & \mathbf{0}_{2 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 2} & 0 \end{bmatrix} \\ \bar{q} &= [q^T \ q_F^T]^T \\ \dot{\bar{q}} &= [\dot{q}^T \ \dot{q}_F^T]^T \\ \ddot{\bar{q}} &= [\ddot{q}^T \ \ddot{q}_F^T]^T \\ \bar{\tau}_c &= [\tau_c^T \ \tau_F^T]^T \\ \bar{\tau}_e &= [\tau_e^T \ 0]^T \end{aligned}$$

式中: $\bar{H}(\bar{q})$ 为增强系统中的对称正定惯性矩阵; $\bar{C}(\bar{q},\dot{\bar{q}})\dot{\bar{q}}$ 项用来描述增强系统中的离心力和科里奥利力; 矩阵 $\bar{C}(\bar{q},\dot{\bar{q}})$ 为对称矩阵; $\bar{q}$ 为增强系统中的关节位移; $\dot{\bar{q}}$ 代表增强系统中的关节速度; $\ddot{\bar{q}}$ 代表增强系统中的关节加速度; $\bar{\tau}_c$ 为增强系统中控制器输出的力矢量; $\bar{\tau}_e$ 为增强系统受到的外力矢量; q_F 为虚拟轴的位置; $\dot{q}_F$ 为虚拟轴的速度。

选择增强系统的动能为增强系统的能量函数如下式:

$$\bar{T}(\bar{q},\dot{\bar{q}}) = \frac{1}{2} \dot{\bar{q}}^T \bar{H}(\bar{q}) \dot{\bar{q}} \quad (6)$$

定义增强系统速度场的总能量为

$$\bar{T}[\bar{q},\bar{V}(\bar{q})] = \frac{1}{2} \bar{V}(\bar{q})^T \bar{H}(\bar{q}) \bar{V}(\bar{q}) = \bar{E} > 0 \quad (7)$$

式中: $\bar{V}(\bar{q})$ 为增强系统中 $\bar{q}$ 处的速度矢量; $\bar{E}$ 为增强系统的总能量(单位: J)。

按照总能量保持恒定的原则来设计新的速度场,则

$$\bar{V}(\bar{q}) = \begin{bmatrix} V(q) \\ V_F(q) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$V_F(q) = \sqrt{\frac{2}{m_F} [\bar{E} - \frac{1}{2} V(q)^T H(q) V(q)]} \quad (9)$$

其中,增强系统的总能量 $\bar{E}$ 要足够大,以使式(9)有意义。将增强系统控制器输出的力矢量 $\bar{\tau}_c(\bar{q}, \dot{\bar{q}})$ 分为2部分,且每部分表达式如下式:

$$\bar{\tau}_c(\bar{q}, \dot{\bar{q}}) = \bar{\tau}_g(\bar{q}, \dot{\bar{q}}) + \bar{\tau}_r(\bar{q}, \dot{\bar{q}}) \quad (10)$$

其中

$$\bar{\tau}_g(\bar{q}, \dot{\bar{q}}) = \frac{1}{2\bar{E}} [w(\bar{q}, \dot{\bar{q}}) P(\bar{q})^T - P(\bar{q}) w(\bar{q}, \dot{\bar{q}})^T] \dot{\bar{q}}$$

$$\bar{\tau}_r(\bar{q}, \dot{\bar{q}}) = \gamma [P(\bar{q}) p(\bar{q}, \dot{\bar{q}})^T - p(\bar{q}, \dot{\bar{q}}) P(\bar{q})^T] \dot{\bar{q}}$$

$$p(\bar{q}, \dot{\bar{q}}) = \bar{H}(\bar{q}) \dot{\bar{q}}$$

$$P(\bar{q}) = \bar{H}(\bar{q}) \bar{V}(\bar{q})$$

$$w(\bar{q}, \dot{\bar{q}}) = \bar{H}(\bar{q}) \dot{\bar{V}}(\bar{q}) + \bar{C}(\bar{q}, \dot{\bar{q}}) \bar{V}(\bar{q})$$

$$\dot{\bar{V}}(\bar{q}) = [\dot{V}_1(\bar{q}) \quad \dot{V}_2(\bar{q}) \quad \dot{V}_3(\bar{q})]^T$$

式中: $p(\bar{q}, \dot{\bar{q}})$ 为增强系统的动量; $P(\bar{q})$ 为增强系统在 $\bar{q}$ 处的期望动量; γ 为控制器增益。

且 $\dot{\bar{V}}(\bar{q})$ 的每个成员如下式:

$$\dot{V}_i(\bar{q}) = \sum_{k=1}^3 \frac{\partial \bar{V}_i(\bar{q})}{\partial \bar{q}_k} \dot{\bar{q}}_k \quad i = 1, 2, 3 \quad (11)$$

2 传统速度场的缺陷

2.1 期望轨迹为多边形

在X-Y双轴联动系统中,期望轨迹为多边形十分常见。但由于多边形的切线向量在拐角处突变,按照式(2)得到的多边形的速度场是不连续的,式(11)将无法计算。

假使将多边形的每个边都看作单独的图案进行切割,又存在着这样的问题:沿着期望轨迹运动时,在期望轨迹上运动时始终保持速度 v_1 ,即使已经运动到期望线段的终点,仍然存在一个不为0的速度,这将导致运动轨迹超过期望线段的终点向反方向运动,此时期望速度 $\dot{q}$ 开始减小,一直到 $d = v_1/\lambda$ 时,期望速度 $V(q) = 0$ 。如图2所示,定义x轴正方向为线段的前进方向,定义y轴为期望速度矢量的模, $(0, |v_1|)$ 对应线段的终点。

在跟随多边形轨迹的过程中,不断查询离当前位置最近的线段,若离当前位置最近的线段发生变化,则改变期望的速度场矢量,并开始跟随该条最近的多边形边。若当前位置处于两边的

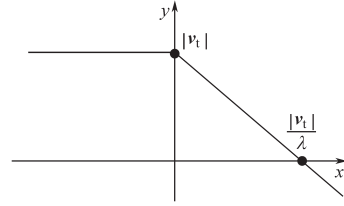


图2 线段终点速度矢量分布

Fig.2 Velocity vector distribution of line end

交点时,当前位置到两条边的距离相同,则以当前位置为起点的边是下一条要跟随的边。但由于机械上的惯性以及电机输出的转矩有限,在拐角处存在过冲,影响轮廓精度。

2.2 期望轨迹为圆形

X-Y两轴联动系统各轴的转矩PI控制器对正弦变化的转矩指令跟随存在迟滞和衰减,当期望轨迹是圆形时,会出现“轨迹缩减”现象。

假使通过增加式(2)中的 λ 来增加径向期望速度分量,以达到减小轮廓误差的目的,又存在这样的问题: λ 增大会导致所有 $d \neq 0$ 位置所映射的期望速度矢量增大,当 $|d|$ 大到一定程度,期望速度矢量在各轴的分量会超过伺服电机的额定转速。系统在电机额定转速下的工作范围变窄。

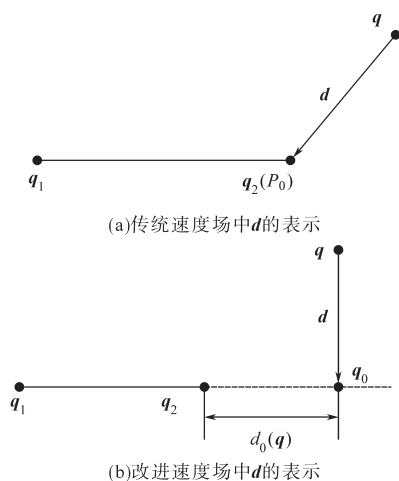
3 变系数的速度场无源控制算法

3.1 期望轨迹为多边形的改进速度场算法

为了避免出现2.1中描述的情况,提出几点期望轨迹为多边形的速度场应该满足的条件:1)在终点处的速度矢量应为0;2)远离终点的切线分量不能为无穷大;3)改进后速度场应处处可导;4)在终点处速度场关于任意方向的导数不为无穷大;5)在没有外力时,刻刀从任意位置出发都收敛于终点,由此提出了变系数的速度场控制算法。

首先定义一条线段的速度场为 V_1 ,线段起点和终点分别为 q_1 和 q_2 。我们对传统速度场进行了2点改进:1) d 由原来由空间任意一点 q 指向期望轨迹上距离该点最近的点 P_0 的距离矢量(如图3a所示)变为由空间任意一点 q 指向该点在期望线段轨迹上垂点 q_0 的距离矢量(如图3b所示),垂点 q_0 到线段终点 q_2 的距离定义为 $d_0(q)$;2)在式(2)切线矢量 v_1 前增加系数 $2/\pi \arctan[\omega_0 d_0(q)]$ 。

改进后的对期望轨迹是多边形的速度场变为

图3 速度场中 d 的表示Fig.3 The representation of d in the velocity field

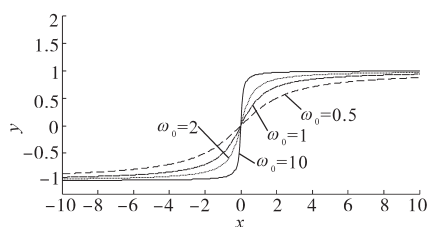
$$\begin{aligned} V(q) &= V_1(q) \\ &= \frac{2}{\pi} \arctan[\omega_0 d_0(q)] \cdot v_i + \lambda d \end{aligned} \quad (12)$$

其中

$$\begin{aligned} d_0(q) &= |q_2 - q_0| \cos \angle q_2 - q_0, q_2 - q_1 > \\ &= \frac{(q_2 - q_0) \cdot (q_2 - q_1)}{|q_2 - q_1|} \\ d &= q_0 - q \end{aligned}$$

式中: ω_0 为大于0的系数。

以 $d_0(q)$ 为自变量 x , $2/\pi \arctan[\omega_0 d_0(q)]$ 为因变量 y , 绘制 ω_0 取不同值时的一组函数图像, 如图4所示。

图4 $y = \frac{2}{\pi} \arctan(\omega_0 x)$ 的函数图像Fig.4 Function image of $y = \frac{2}{\pi} \arctan(\omega_0 x)$

由图4可以看到, 相同 $d_0(q)$ 随着 ω_0 的增大, 所对应的 $|2/\pi \arctan[\omega_0 d_0(q)]|$ 增大。且 ω_0 增大时, 原点附近的曲线斜率增大, 对应到实际系统中, 切线方向速度分量急剧减小, 这要求电机输出更大的转矩。我们在实际系统中要综合考虑电机输出转矩和运动速度要求来选择合适的 ω_0 。

沿着期望轨迹向终点运动的过程中, $2/\pi \arctan[\omega_0 d_0(q)]$ 不断减小, 直到终点处该系数为0。当越过终点反方向运动后, 该系数为负, 期望速度矢量反向, 最终将回到终点附近。

3.2 期望轨迹为圆形的改进速度场算法

为了避免出现2.2节中描述的情况, 我们希望能有一个系数 $\bar{\lambda}(|d|)$, 随着距离矢量 d 的模 $|d|$ 的增大而减小, 从而使 $|d|$ 较大时 $|\bar{\lambda}(|d|)d|$ 不是非常大。

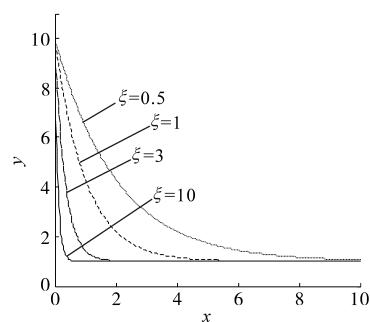
根据对改进速度场的新需求, 我们来构造期望轨迹为圆形的改进速度场算法:

$$V(q) = V_c(q) = v_i + \bar{\lambda}(|d|)d \quad (13)$$

其中 $\bar{\lambda}(|d|) = (\lambda - 1) \exp(-\xi |d|) + 1$

式中: ξ 为大于0的实数。

以 $|d|$ 为自变量 x , $\bar{\lambda}(|d|)$ 为因变量 y , 绘制 ξ 取不同值时的一组函数图像, 如图5所示。

图5 $y = \bar{\lambda}(x)$ 的函数图像Fig.5 Function image of $y = \bar{\lambda}(x)$

由图5可以看到, 相同 $|d|$ 随着 ξ 的增大对应的 $\bar{\lambda}(|d|)$ 越小, 也就是随着 ξ 的增大, $\bar{\lambda}(|d|)$ 衰减的越快。较大的 ξ 可有效避免 $|d|$ 较大时径向速度分量过大而使系统工作范围变窄, 但也会使得接近期望轨迹处的径向速度分量减小, 对“轨径缩减”现象改善程度不明显。我们在实际中要综合对圆形轨迹的跟踪精度要求以及电机的额定转速来选择合适的 ξ 。

$$\lim_{|d| \rightarrow 0} \bar{\lambda}(|d|) = \lambda \quad (14)$$

$$\lim_{|d| \rightarrow \infty} \bar{\lambda}(|d|) = 1 \quad (15)$$

由式(14), 当十分接近期望轨迹时, $\bar{\lambda}(|d|)$ 近似为 λ , 增加径向速度分量, 削弱“轨径缩减”现象。由式(15), 当远离期望轨迹时, $\bar{\lambda}(|d|)$ 近似为1, 保证了系统的工作范围不变。

4 仿真验证

4.1 仿真跟踪多边形轨迹

在 Matlab/Simulink 中分别将传统速度场算法和变系数的速度场算法应用于 X-Y 双轴联动切割控制系统中, 仿真跟踪一个矩形轨迹。采用

传统速度场算法仿真结果如图6所示,采用变系数的速度场算法仿真结果如图7所示。

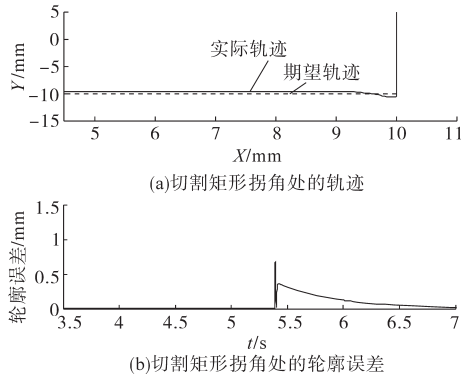


图6 应用传统速度场算法跟踪矩形仿真波形
Fig.6 Simulation waveforms using traditional velocity field control to track rectangular

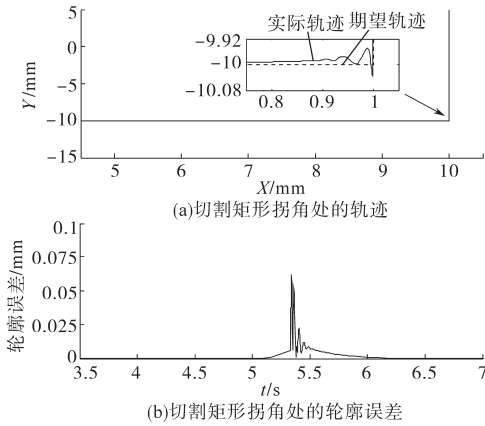


图7 变系数的速度场控制算法跟踪矩形仿真波形
Fig.7 Simulation waveforms of tracking rectangular with coefficient-variable velocity field control

图6和图7分别采用传统速度场算法和变系数的速度场控制算法来切割长宽相同的矩形,从相同边开始切割,且平均切割速度相近。由图6b和图7b对比得到,采用传统速度场算法和采用变系数的速度场控制算法均在5.4 s左右到达矩形的拐角处,即采用2种算法的平均切割速度相近。但图6中,在多边形拐角处过冲明显,轮廓误差接近0.75 mm。在理想仿真情况下尚且如此,实际中使用传统速度场算法很难实现对期望轨迹的精确跟踪。图7中,在多边形拐角处过冲肉眼不可见,且轮廓误差小于0.075 mm,是原来误差的10%左右,精度明显提高。

仿真结果表明,变系数的速度场算法跟踪矩形轨迹精度提高,在矩形拐角处过冲大大减小。

4.2 仿真跟踪圆形轨迹

在 Matlab/Simulink 中分别将传统速度场算法和变系数的速度场算法应用于 X-Y 双轴联

动切割控制系统中,仿真跟踪一个圆形轨迹。采用传统速度场算法仿真结果如图8所示,采用变系数的速度场算法仿真结果如图9所示。

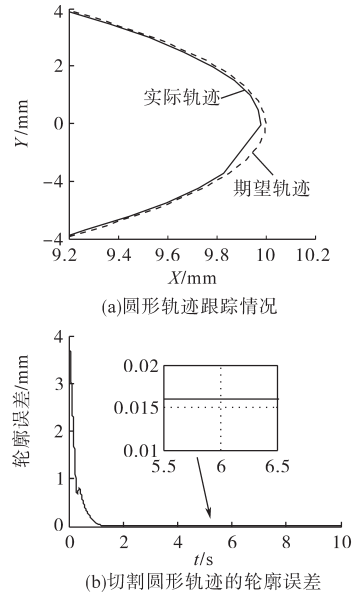


图8 应用传统速度场算法跟踪圆形仿真波形
Fig.8 Simulation waveforms using traditional velocity field control to track circular

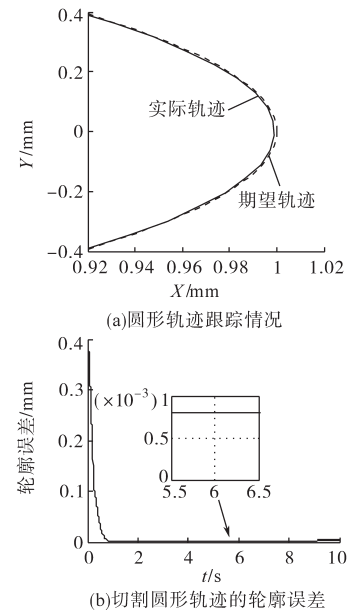


图9 变系数的速度场算法跟踪圆形波形
Fig.9 Simulation waveforms using coefficient-variable velocity field control to track circular

图8a在跟踪圆形轨迹的过程中“轨径缩减”现象明显,图9a在跟踪圆形轨迹过程中“轨径缩减”现象得到改善;图9b中轮廓误差不到1 μm ,只有图8b中的轮廓误差的6%左右。

仿真结果表明,变系数的速度场算法跟踪圆形轨迹精度提高,“轨径缩减”现象得到改善。

2017新要求的型式试验项目;比较旧版标准GB/T 7251.3—2006,具体说明有变化的型式试验项目。结合各型式试验项目自身的特点,按照实际生产及生活中的应用,给出建议性型式试验程序。结合实际案例具体说明温升试验的各试验方法,给出各温升试验方法的温升电流测试方案。

参考文献

- [1] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 7251.3—2017/IEC 61439—3:2012 低压成套开关设备和控制设备第3部分:由一般人员操作的配电板(DBO)[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [2] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 7251.3—2006/IEC 60439—3:2001 低压成套开关设备和控制设备第3部分:对非专业人员可进入场地的低压成套开关设备和控制设备——配电板的特殊要求[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [3] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 7251.1—2013/IEC 61439—1:2011 低压成套开关设备和控制设备第1部分:总则[S].北京:中国标准出版社,2014.
- [4] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 16422.2—2014/ISO 4892—2:2006 塑料 实验室光源暴露试验方法第2部分:疝气灯[S].北京:中国标准出版社,2014.
- [5] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 9341—2008/ISO 178:2001 塑料弯曲性能的测定[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [6] 化学工业部成都有机硅研究中心. ISO 179—1982 中国标准书号[S].北京:中国标准出版社,1982.
- [7] 中国国家标准化管理委员会. GB 7251.1—2005/IEC 60439—1:1999 低压成套开关设备和控制设备第1部分:型式试验和部分型式试验成套设备[S].北京:中国标准出版社,2005.
- [8] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 20641—2006/IEC 62208:2002 低压成套开关设备和控制设备空壳体的一般要求[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [9] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 7251.12—2013/IEC 61439—2:2011 低压成套开关设备和控制设备第2部分:成套电力开关和控制设备[S].北京:中国标准出版社,2014.
- [10] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 17626.6—2008/IEC 61000—4—6:2006 电磁兼容 试验和测试技术 射频场感应的传导骚扰抗扰度[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [11] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 17626.8—2006/IEC 61000—4—8:2001 电磁兼容 试验和测试技术 工频磁场抗扰度试验[S].北京:中国标准出版社,2007.
- [12] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 17626.11—2008/IEC 61000—4—11:2004 电磁兼容 试验和测试技术 电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度试验[S].北京:中国标准出版社,2008.

收稿日期:2019-07-16

修改稿日期:2019-07-30

(上接第59页)

- tions on Automatic Control, 2001, 46(9): 1360-1371.
- [4] Li P Y. Adaptive Passive Velocity Field Control[C]// Proceedings of the American Control Conference, 1999: 774-779.
- [5] Yamakita Masaki, Asano Fumihiko, Furuta Katsuhisa. Passive Velocity Field Control of Biped Walking Robot[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2005: 3057-3062.
- [6] 宋国立,韩冰,赵忆文,等. 脊柱微创手术机器人速度场控制方法[J]. 机器人, 2016, 38(5): 603-611.
- [7] Munoz-Vazquez A -J, Parra-Vega V, Sanchez A, et al. Passive Velocity Field Control for Contour Tracking of Robots with Model-free Controller[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2013: 1934-1940.
- [8] 王丽梅,李兵. 直线电机驱动XY平台的速度场轨迹规划与控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 438-444.
- [9] Ha Changsu, Choi Francis B, Lee Dongjun. Preliminary Results on Passive Velocity Field Control of Quadrotors[C]// 2012 9th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence(URAI), 2012: 378-379.
- [10] Kunimune Tomohiro, Fukui Yoshiro, Wadal Takahiro. Passive Velocity Field Control with Discontinuous Desired Velocity Fields: Non-smooth Potential Gradient Vector Field by Locally Semiconcave Functions[C]// 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2016: 1165-1172.

收稿日期:2018-09-20

修改稿日期:2018-12-06