

高压输电线路带电检修机器人作业臂运动优化

江 维[✉], 吴功平, 樊 飞, 张 颀

武汉大学动力与机械学院, 武汉 430072

✉ 通信作者, E-mail: jiangwei2013@whu.edu.cn

摘 要 针对完全依靠人工带电拧紧高压输电线路引流板螺栓作业效率低、劳动强度大、高空和高电压危险的问题, 研制了一种双臂和双机械手的引流板螺栓拧紧带电检修机器人。通过各关节的轨迹规划双作业臂及其末端由初始位姿运动到螺栓螺母对准状态是机器人顺利完成检修作业的关键。针对现有多项式插值关节轨迹规划依赖于轨迹端点时刻, 导致该方法实用性差及关节轨迹运动过程中忽略驱动机构对关节状态制约的问题, 提出基于 Min-Max 时间标准化的改进多项式插值关节轨迹规划方法。基于该方法, 以关节运动时间为优化对象, 提出满足关节轨迹运动全程约束条件的关节运动时间区间范围的求取方法。通过仿真实验验证了改进算法关节轨迹仅与轨迹端点状态及运动时间有关, 而与端点时刻无关, 进一步淡化轨迹端点时刻对关节轨迹的影响, 提高算法的实用性。通过选取最优关节轨迹运动时间, 满足了关节状态全程状态约束要求, 从而避免超调的发生, 优化了各关节运动轨迹, 提高了关节运动的效率。最后通过现场试验进一步验证改进算法的工程实用性。

关键词 高压输电线路; 机器人; 作业臂控制; 运动规划; 优化

分类号 TP242.3

Working manipulator motion optimization of live maintenance robot for high voltage transmission line

JIANG Wei[✉], WU Gong-ping, FAN Fei, ZHANG Jie

School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China

✉ Corresponding author, E-mail: jiangwei2013@whu.edu.cn

ABSTRACT In response to the problems of artificial low-operation efficiency, high labor intensity, high altitude and high risk in drainage board bolt tightening for high voltage transmission line, a bolt tightening live maintenance robot with double arms and double manipulators was designed in this paper. The key to the successful completion of maintenance work is that double working arms and their ends move from the initial position to the bolt and nut alignment state through the trajectory planning of each joint of the robot. The existed polynomial interpolation of joint trajectory planning depends on trajectory endpoint time, leading to some issues such as the low practicability of the method and the neglect of the constraints of the drive mechanism on the joint state in joint trajectory motion, so an improved polynomial interpolation joint trajectory planning method based on Min-Max time standardization was presented. Based on the method, a solving method of joint motion time ranges which meet the requirements of joint trajectory motion constraints was proposed with articulation motion time as the optimization target. Simulation results show that the joint trajectory of the improved algorithm is only with regard to trajectory endpoint state and motion time, but not to trajectory endpoint time, which further dilutes the influence of trajectory endpoint time on the joint trajectory, and the practicality of the algorithm is also improved. By selecting the optimal trajectory articulation motion time which meets the requirements of whole joint state constraints, the improved algorithm not only avoids the occurrence of overshooting and optimizes the trajectory of each joint, but also improves the efficiency of joint motion. Finally, the engineering practicality of the improved algorithm was verified by field operation test.

收稿日期: 2015-12-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51105281); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2104005); 湖南省电力公司科技项目(5216A01400B1)

KEY WORDS high voltage transmission line; robot; manipulator control; motion planning; optimization

带电检修^[1-3]是指在高压电气设备上不停电进行检修、测试的一种作业方法,其对电网稳定运行、确保稳定供电具有极其重要的意义。引流板螺栓紧固是电力部门带电检修的重要内容之一,传统的螺栓拧紧方法^[4-6]主要是通过携带工具登塔完全依靠人工独立完成,然而高空、高电压环境使得完全依靠人工的方式不仅劳动强度大和效率低,而且危险性高。基于此,本文研制了一种高压线路引流板螺栓紧固带电检修机器人,通过搭载的双作业臂及其作业末端套筒完成关键位置的定位,实现引流板螺栓的紧固作业。带电检修机器人在作业过程中,作业臂由初始位姿到工作位姿各关节位置、速度和加速度状态的瞬间突变对作业臂造成一定冲击,导致机器人振动的发生,给作业臂及其末端的运动定位精度带来一定影响,因此快速、准确、稳定的作业臂多关节轨迹规划是保证作业任务顺利完成的关键。

机器人关节运动规划方法有 A^* 算法^[7]、C 空间法^[8]、人工势场法^[9]、MARKOV 法^[10]等。在众多方法中多项式插值算法应用最为普遍,常用的插值多项式有样条函数、三次多项式、五次多项式和高阶多项式。三次多项式插值算法^[11]简单但不能满足关节加速度的约束要求;高阶多项式插值算法^[12]能够满足关节加速度甚至关节脉动的约束要求但算法过于复杂且容易产生额外运动;结合机器人作业臂对位置、速度和加速度的控制要求,五次多项式插值算法^[13]及与其相结合的智能优化算法^[14]能够满足作业臂关节运动规划要求。当前关节轨迹多项式插值规划研究成果在一定程度上优化了机械臂的运动轨迹,但是存在两个问题:其一,关节轨迹与轨迹端点时刻有关,一旦轨迹端点时刻发生改变,轨迹函数需要重新计算,从而在一定程度上降低算法的实用性;其二,轨迹规划过于理想化,只考虑了轨迹端点的关节状态约束条件,而忽略了中间过程的关节状态约束,即驱动机构会约束关节在任意时刻的运动状态而绝非只是轨迹端点处。通常情况下,当关节低速运动时只需要保证关节位置不超限,关节速度和加速度不易越过约束范围,但当关节高速运动时,关节速度和加速度很容易越过其约束范围,其结果是可能会导致关节电机驱动电流过大损坏机器人硬件系统。因此,在关节轨迹规划时必须考虑各种约束条件^[15-16],否则可能会造成大的作业事故。

针对上述问题,为消除关节轨迹端点时刻对关节轨迹的影响,本文将关节运动时间进行 Min-Max 标准化处理,引入标准化时间的概念,以标准化时间为插值多项式变量,这样作业臂关节运动轨迹仅与轨迹端点

状态及关节运动时间有关,而与作业臂关节轨迹端点时刻没有直接联系,当端点时刻发生改变后,只需将关节轨迹与标准化时间的映射关系转换为与物理时间的映射就可以得到新的关节轨迹函数,因而减小计算量,提高算法的实用性。为使关节轨迹运动规划更趋于关节实际运动,解决关节轨迹全局位置约束问题,提出以轨迹运动时间为优化对象,轨迹最优运动时间所在区间的求取方法,通过关节运动时间的优化获得满足全局约束条件的最优关节轨迹,避免超调的发生,提高关节的运动效率和机器人作业的安全性。通过本文轨迹规划方法的推广可进一步解决关节速度和加速度状态约束问题。

1 带电检修机器人的实体结构

带电检修机器人由双行走臂、双作业臂及其末端及控制箱等组成,其实体结构如图1所示。双行走臂能够在线路上行走,作业臂1由旋转关节、伸缩关节和纵移关节组成,作业臂2由横移关节、旋转关节、伸缩关节和纵移关节组成。双作业臂在线路上作业时都有足够裕度,使其能满足检修作业空间要求。拧螺母作业末端套筒通过燕尾槽固定在作业臂纵移关节上,安装于作业臂2的作业末端套筒有大功率电机,可以实现螺栓紧固,末端采用六角套筒扳手形式以确保套筒与螺栓接触面足够大,此外末端内设复位弹簧的虎克铰,能够适应耐张线夹螺栓一定角度的位置,减小紧固螺栓时对末端产生的内应力。输电导线和耐张引流线通过引流板相联接,其中联接部分通过螺栓固定起来。在进行螺栓紧固作业时,先利用机械手1末端将螺栓头固定,再由机械手2末端套筒套住螺母,通过末端工具电机的转向控制实现螺栓的松开和拧紧操作。

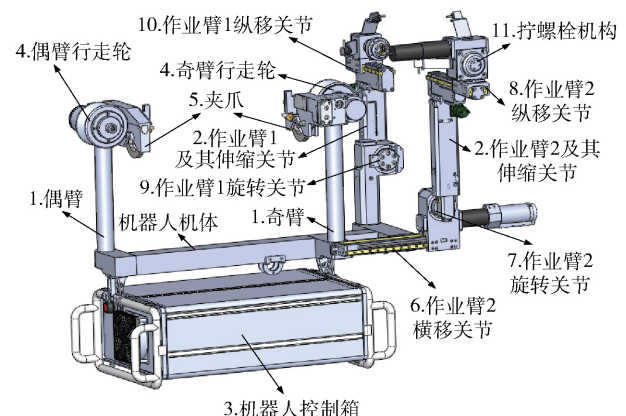


图1 带电检修机器人实体结构图

Fig. 1 Entity structure of the live maintenance robot

2 改进 N 次多项式插值轨迹规划算法的基本原理

2.1 常规 N 次多项式轨迹规划算法

常规多项式插值关节轨迹运动规划方法是通过轨迹端点处关节的边界状态来确定唯一的一个插值多项式. 设起始和终点时刻分别为 t_0 和 t_f , 起点的状态分别为 $x_0, \dot{x}_0, \ddot{x}_0, \dots$, 终点的状态分别为 $x_f, \dot{x}_f, \ddot{x}_f, \dots$, 插值函数为 $x(t)$, 则 $x(t)$ 满足式(1)的边界条件.

$$\begin{cases} x(t_0) = x_0, \\ x(t_f) = x_f, \\ \dot{x}(t_0) = \dot{x}_0, \\ \dot{x}(t_f) = \dot{x}_f, \\ \ddot{x}(t_0) = \ddot{x}_0, \\ \ddot{x}(t_f) = \ddot{x}_f, \\ \dots \\ x^{(n)}(t_0) = x_0^{(n)}, \\ \dots \end{cases} \quad (1)$$

由式(1) $n+1$ 个边界条件可确定唯一的一个关节轨迹 n (n 为奇数) 次多项式:

$$x(t) = a_n t^n + a_{n-1} t^{n-1} + a_{n-2} t^{n-2} + \dots + a_2 t^2 + a_1 t + a_0. \quad (2)$$

将式(1) $n+1$ 个边界条件代入式(2)可得到 $n+1$ 元一次方程组, 所以可解得插值多项式系数 $a_0 \sim a_n$, 从而获取关节的运动轨迹多项式.

2.2 改进 N 次多项式轨迹规划算法

常规 N 次多项式插值轨迹是时间 t 的函数. 对于不同的端点时刻有不同的边界状态, 插值多项式系数需要重新计算. 为淡化端点时刻对插值多项式的影响, 减小插值系数的计算量, 对时间变量 t 进行 Min-Max 标准化处理, 将物理时间转化为一个无量纲的标准化时间变量 t_α . 如式(3), 则关节轨迹函数可表示为式(4), 再根据轨迹端点处的关节状态值可求得关节关于 t_α 的多项式轨迹.

$$t_\alpha = \frac{t - t_0}{t_f - t_0}, \quad 0 \leq t_\alpha \leq 1. \quad (3)$$

$$x(t_\alpha) = x_0 + (x_f - x_0) \cdot \text{Rand}(t_\alpha), \quad 0 \leq \text{Rand}(t_\alpha) \leq 1. \quad (4)$$

式(4)中 $\text{Rand}(t_\alpha)$ 为 $[0, 1]$ 之间的随机函数, 可对关节轨迹函数进行实时修正. 当 $t = t_0$ 时 $\text{Rand}(t_\alpha) = 0$, 此时表示轨迹起点; 当 $t = t_f$ 时 $\text{Rand}(t_\alpha) = 1$, 此时表示轨迹终点; 当 $0 < \text{Rand}(t_\alpha) < 1$ 时表示关节轨迹运动过程中的任意一个中间点. 对式(4)分别求一阶导数、二阶导数、三阶导数至 $\frac{1}{2}(n-1)$ 阶导数, 可得关节轨迹速度、加速度函数、加加速度等状态如式(5)所示.

$$\begin{cases} \dot{x}(t_\alpha) = \frac{x_f - x_0}{t_f - t_0} \text{Rand}(t_\alpha), \\ \ddot{x}(t_\alpha) = \frac{x_f - x_0}{(t_f - t_0)^2} \text{Rand}(t_\alpha), \\ \ddot{\ddot{x}}(t_\alpha) = \frac{x_f - x_0}{(t_f - t_0)^3} \text{Rand}(t_\alpha), \\ \dots \\ x^{(\frac{n-1}{2})}(t_\alpha) = \frac{x_f - x_0}{(t_f - t_0)^{\frac{n-1}{2}}} \text{Rand}(\frac{n-1}{2})(t_\alpha). \end{cases} \quad (5)$$

n 阶多项式插值轨迹需要 $n+1$ 个初始条件, 由于插值端点初始状态的对称性 n 一般为奇数, 若定义关节轨迹的运行时间为 $t_{\text{motion}} = t_f - t_0$, 轨迹端点位置差 $S = x_f - x_0$, 将关节变量两个端点的边界条件分别代入式(4)和式(5)可得式(6).

$$\begin{cases} x(t_0) = x_0 + S \text{Rand}(0) = x_0, \\ x(t_f) = x_0 + S \text{Rand}(1) = x_f, \\ \dot{x}(t_0) = \frac{S}{t_{\text{motion}}} \text{Rand}(0) = \dot{x}_0, \\ \dot{x}(t_f) = \frac{S}{t_{\text{motion}}} \text{Rand}(1) = \dot{x}_f, \\ \ddot{x}(t_0) = \frac{S}{t_{\text{motion}}^2} \text{Rand}(0) = \ddot{x}_0, \\ \ddot{x}(t_f) = \frac{S}{t_{\text{motion}}^2} \text{Rand}(1) = \ddot{x}_f, \\ \dots \\ x^{(\frac{n-1}{2})}(t_0) = \frac{S}{t_{\text{motion}}^{\frac{n-1}{2}}} \text{Rand}(\frac{n-1}{2})(0) = x_0^{(\frac{n-1}{2})}, \\ x^{(\frac{n-1}{2})}(t_f) = \frac{S}{t_{\text{motion}}^{\frac{n-1}{2}}} \text{Rand}(\frac{n-1}{2})(1) = x_f^{(\frac{n-1}{2})}. \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可得 $\text{Rand}(t_\alpha)$ 函数的 $n+1$ 个边界条件式(7).

$$\begin{cases} \text{Rand}(0) = 0, \\ \text{Rand}(1) = 1, \\ \dot{\text{Rand}}(0) = \frac{\dot{x}_0 t_{\text{motion}}}{S}, \\ \dot{\text{Rand}}(1) = \frac{\dot{x}_f t_{\text{motion}}}{S}, \\ \ddot{\text{Rand}}(0) = \frac{\ddot{x}_0 t_{\text{motion}}^2}{S}, \\ \ddot{\text{Rand}}(1) = \frac{\ddot{x}_f t_{\text{motion}}^2}{S}, \\ \dots \\ \text{Rand}(\frac{n-1}{2})(0) = \frac{x_0^{(\frac{n-1}{2})} t_{\text{motion}}^{\frac{n-1}{2}}}{S}, \\ \text{Rand}(\frac{n-1}{2})(1) = \frac{x_f^{(\frac{n-1}{2})} t_{\text{motion}}^{\frac{n-1}{2}}}{S}. \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)的 $n+1$ 个边界条件可唯一确定 $\text{Rand}(t_\alpha)$ 的一个 n 次多项式:

$$\text{Rand}(t_\alpha) = A_n(t_\alpha)^n + A_{n-1}(t_\alpha)^{n-1} + \cdots + A_2(t_\alpha)^2 + A_1 t_\alpha + A_0. \quad (8)$$

对式(8)求一阶导数、二阶导数至 $\frac{1}{2}(n-1)$ 阶导数可得式(9).

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\text{Rand}}(t_\alpha) = n A_n t_\alpha^{n-1} + (n-1) A_{n-1} t_\alpha^{n-2} + \cdots + 2 A_2 t_\alpha + A_1, \\ \ddot{\text{Rand}}(t_\alpha) = n(n-1) A_n t_\alpha^{n-2} + (n-1)(n-2) A_{n-1} t_\alpha^{n-3} + \cdots + 2 A_2, \\ \dots \\ \text{Rand}^{(\frac{n-1}{2})}(t_\alpha) = n(n-1) \cdots \left(n - \frac{n-3}{2}\right) A_n (t_\alpha)^{(\frac{n+1}{2})} + (n-1)(n-2) \cdots \left(n - \frac{n-1}{2}\right) \cdot A_{n-1} (t_\alpha)^{(\frac{n-1}{2})} + \cdots + \left(\frac{n-1}{2}\right)! A_{(\frac{n-1}{2})}. \end{array} \right. \quad (9)$$

将式(7)边界条件分别代入式(8)和式(9)可得式(10).

$$\left\{ \begin{array}{l} A_0 = \text{Rand}(0), \\ A_n + A_{n-1} + \cdots + A_1 + A_0 = \text{Rand}(1), \\ \dot{A}_1 = \dot{\text{Rand}}(0), \\ n A_n + (n-1) A_{n-1} + \cdots + 2 A_2 + A_1 = \dot{\text{Rand}}(1), \\ \dots \\ \left(\frac{n-1}{2}\right)! A_{(\frac{n-1}{2})} = \text{Rand}^{(\frac{n-1}{2})}(0), \\ n(n-1) \cdots \left(n - \frac{n-3}{2}\right) A_n + (n-1)(n-2) \cdots \left(n - \frac{n-1}{2}\right) A_{n-1} + \cdots + \left(\frac{n-1}{2}\right)! A_{(\frac{n-1}{2})} = \text{Rand}^{(\frac{n-1}{2})}(1). \end{array} \right. \quad (10)$$

为便于算法的推广及 MATLAB 计算将式(10)改写为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 0 & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 1 & 1 \\ 0 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 1 & 0 \\ n & n-1 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 2 & 1 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ n(n-1) \cdots \left(n - \frac{n-3}{2}\right) & (n-1)(n-2) \cdots \left(n - \frac{n-1}{2}\right) & \cdots & \cdots & \cdots & \left(\frac{n-1}{2}\right)! & \cdots & \cdots \end{bmatrix}_{(n+1) \times (n+1)} \cdot \begin{bmatrix} A_n \\ A_{n-1} \\ A_{n-2} \\ \cdots \\ A_{(\frac{n-1}{2})} \\ \cdots \\ A_2 \\ A_1 \\ A_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Rand}(0) \\ \text{Rand}(1) \\ \dot{\text{Rand}}(0) \\ \dot{\text{Rand}}(1) \\ \cdots \\ \text{Rand}^{(\frac{n-3}{2})}(0) \\ \text{Rand}^{(\frac{n-3}{2})}(1) \\ \text{Rand}^{(\frac{n-1}{2})}(0) \\ \text{Rand}^{(\frac{n-1}{2})}(1) \end{bmatrix}. \quad (11)$$

所以,

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} A_n \\ A_{n-1} \\ A_{n-2} \\ \dots \\ A_{\left(\frac{n-1}{2}\right)} \\ \dots \\ A_2 \\ A_1 \\ A_0 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & 1 \\ 1 & 1 & \dots & \dots & \dots & \dots & 1 & 1 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 1 & 0 \\ n & n-1 & \dots & \dots & \dots & \dots & 2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ n(n-1) \dots \left(n - \frac{n-3}{2}\right) & (n-1)(n-2) \dots \left(n - \frac{n-1}{2}\right) & \dots & \dots & \dots & \left(\frac{n-1}{2}\right)! & \dots & \dots \end{bmatrix}^{-1} \cdot \\
 &\begin{bmatrix} \text{Rand}(0) \\ \text{Rand}(1) \\ \text{Rand}(0) \\ \text{Rand}(1) \\ \dots \\ \text{Rand}\left(\frac{n-3}{2}\right)(0) \\ \text{Rand}\left(\frac{n-3}{2}\right)(1) \\ \text{Rand}\left(\frac{n-1}{2}\right)(0) \\ \text{Rand}\left(\frac{n-1}{2}\right)(1) \end{bmatrix}. \quad (12)
 \end{aligned}$$

通过式(12) MATLAB 矩阵运算即可解得 $\text{Rand}(t_\alpha)$ 的系数, 从而可以获取关于 t_α 的关节 n 次多项式插值轨迹. 由于对于一般的关节而言满足位置、速度和加速度的性能要求就可以达到较好的轨迹规划效果, 因此一般情况下采用五次多项式插值算法即可满足性能要求. 本文以五次多项式插值为例可求得轨迹多项式的系数为式(13).

$$\begin{cases} A_5 = -6\text{Rand}(0) + 6\text{Rand}(1) - 3\text{Rand}(0) - \\ \quad 3\text{Rand}(1) - 0.5\text{Rand}(0) + 0.5\text{Rand}(1), \\ A_4 = 15\text{Rand}(0) - 15\text{Rand}(1) + 8\text{Rand}(0) + \\ \quad 7\text{Rand}(1) + 1.5\text{Rand}(0) - \text{Rand}(1), \\ A_3 = -10\text{Rand}(0) + 10\text{Rand}(1) - 6\text{Rand}(0) - \\ \quad 4\text{Rand}(1) - 1.5\text{Rand}(0) + 0.5\text{Rand}(1), \\ A_2 = 0.5\text{Rand}(0), \\ A_1 = \text{Rand}(0), \\ A_0 = \text{Rand}(0). \end{cases} \quad (13)$$

将式(7)边界条件代入式(13)得式(14).

$$\begin{cases} A_5 = 6 + \frac{-3\dot{x}_0 t_{\text{motion}} - 3\dot{x}_f t_{\text{motion}} - 0.5\ddot{x}_0 t_{\text{motion}}^2 + 0.5\ddot{x}_f t_{\text{motion}}^2}{S}, \\ A_4 = -15 + \frac{8\dot{x}_0 t_{\text{motion}} + 7\dot{x}_f t_{\text{motion}} + 1.5\ddot{x}_0 t_{\text{motion}}^2 - \ddot{x}_f t_{\text{motion}}^2}{S}, \\ A_3 = 10 + \frac{-6\dot{x}_0 t_{\text{motion}} - 4\dot{x}_f t_{\text{motion}} - 1.5\ddot{x}_0 t_{\text{motion}}^2 + 0.5\ddot{x}_f t_{\text{motion}}^2}{S}, \\ A_2 = \frac{0.5\ddot{x}_0 t_{\text{motion}}^2}{S}, \\ A_1 = \frac{\dot{x}_0 t_{\text{motion}}}{S}, \\ A_0 = 0. \end{cases} \quad (14)$$

将求得的系数式(14)代入式(8)可得 $\text{Rand}(t_\alpha)$ 的五次多项式为式(15), 将式(15)代入式(4)可得基于标准化时间的关节轨迹函数 $x(t_\alpha)$ 为式(16).

$$\begin{aligned}
 \text{Rand}(t_\alpha) &= \\
 &\left(6 + \frac{-3\dot{x}_0 t_{\text{motion}} - 3\dot{x}_f t_{\text{motion}} - 0.5\ddot{x}_0 t_{\text{motion}}^2 + 0.5\ddot{x}_f t_{\text{motion}}^2}{S}\right) t_\alpha^5 + \\
 &\left(-15 + \frac{8\dot{x}_0 t_{\text{motion}} + 7\dot{x}_f t_{\text{motion}} + 1.5\ddot{x}_0 t_{\text{motion}}^2 - \ddot{x}_f t_{\text{motion}}^2}{S}\right) t_\alpha^4 + \\
 &\left(10 + \frac{-6\dot{x}_0 t_{\text{motion}} - 4\dot{x}_f t_{\text{motion}} - 1.5\ddot{x}_0 t_{\text{motion}}^2 + 0.5\ddot{x}_f t_{\text{motion}}^2}{S}\right) t_\alpha^3 + \\
 &\frac{0.5\ddot{x}_0 t_{\text{motion}}^2}{S} t_\alpha^2 + \frac{\dot{x}_0 t_{\text{motion}}}{S} t_\alpha. \quad (15)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
x(t_\alpha) = & (6S - 3\dot{x}_0 t_{\text{motion}} - 3\dot{x}_f t_{\text{motion}} - 0.5\ddot{x}_0 t_{\text{motion}}^2 + \\
& 0.5\ddot{x}_f t_{\text{motion}}^2) t_\alpha^5 + (-15S + 8\dot{x}_0 t_{\text{motion}} + 7\dot{x}_f t_{\text{motion}} + \\
& 1.5\ddot{x}_0 t_{\text{motion}}^2 - \ddot{x}_f t_{\text{motion}}^2) t_\alpha^4 + (10S + 6\dot{x}_0 t_{\text{motion}} - \\
& 4\dot{x}_f t_{\text{motion}} - 1.5\ddot{x}_0 t_{\text{motion}}^2 + 0.5\ddot{x}_f t_{\text{motion}}^2) t_\alpha^3 + \\
& 0.5\ddot{x}_0 t_{\text{motion}}^2 t_\alpha^2 + 3\dot{x}_0 t_{\text{motion}} t_\alpha + x_0. \quad (16)
\end{aligned}$$

通过对式(16)求导可得关节轨迹速度与加速度的表达式. 上述各式为轨迹的标准化时间函数, 若要转换为物理时间函数可将 $t_\alpha = \frac{t-t_0}{t_f-t_0}$ ($0 \leq t_\alpha \leq 1$) 代入各式即可.

3 带电检修机器人作业臂多关节轨迹优化

3.1 双作业臂运动模型的建立

机器人双作业臂位姿的规划是依靠各关节的运动来实现的, 因此必须将双作业臂轨迹转换到关节空间, 再在关节空间中进行轨迹规划. 通过机器人双作业臂各关节的轨迹规划, 使得双作业臂由初始位姿运

动到作业位姿, 实现双作业手末端与引流板螺栓螺母的对准对接. 为便于分析以定位到压接管的机器人奇臂行走轮为空间坐标原点, 沿导线方向为 X 轴、作业臂伸缩方向为 Y 轴、作业手纵移方向为 Z 轴建立空间坐标系. 设机器人作业手末端在空间坐标系中的坐标为 $P_{0i}(x_{0i}, y_{0i}, z_{0i})$ ($i=1$ 时表示作业手1, $i=2$ 时表示作业手2), 将 P_{0i} 定义为机器人双作业手的初始位置如图2(a)所示. 设引流板螺栓螺母在空间坐标系中的坐标为 $P_{fi}(x_{fi}, y_{fi}, z_{fi})$ ($i=1$ 时表示螺栓, $i=2$ 时表示螺母), 将 P_{fi} 定义为机器人双作业手的终止位姿如图2(b)所示. 机器人作业手末端由初始位姿到螺栓螺母的对准状态整个过程可抽象为作业臂各关节轨迹规划控制问题, 其实质是作业手在空间坐标系中由初始位姿 P_{0i} 通过作业臂的旋转、伸缩和横移, 作业手的纵移关节运动调整双作业手在空间坐标系中的位姿, 不断逼近理想位姿 P_{fi} 的过程.

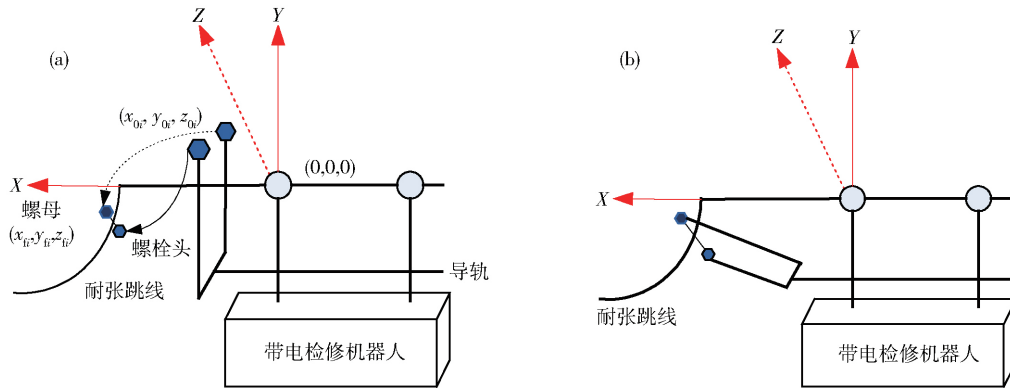


图2 机器人双作业臂运动规划. (a) 初始位姿; (b) 理想位姿

Fig.2 Motion planning of the robot's double manipulators: (a) initial pose; (b) ideal pose

3.2 基于运动时间最优的关节轨迹优化

理论上讲作业臂关节轨迹状态包括速度和加速度都会由于机械设计及关节电机的因素而限定在一定范围之内. 作业臂关节速度轨迹应该在关节电机输出的最大转速与最小转速之间、关节加速度轨迹会受到关节电机驱动力矩的限制, 也应该在某个区间范围内, 但关节速度轨迹和加速度轨迹的制约均可以通过关节电机的选型解决. 通过选择合适参数的电机来克服关节速度和加速度的制约条件. 因此关于作业臂轨迹优化, 本文主要研究的是关节位置约束优化问题, 通过本文方法的推广也可进一步研究关节速度和加速度约束优化问题.

采用多项式插值法对作业臂进行运动规划, 任意关节轨迹的端点位置需要满足关节位置的约束要求, 在整个运动过程中如果关节位置从起点到终点呈单调递增或递减运动状态, 那么在满足这种条件状态下时可保证关节位置满足其运动约束条件. 由改进多项式插值轨迹规划算法可知, 关节运动轨迹仅仅与起点和

终点的状态及轨迹的运动时间有关, 而与端点时刻无关. 因此可以考虑通过优化关节的运动时间, 使得关节速度轨迹在运动时间内呈单调递增或递减状态, 以保证关节位置轨迹满足其约束条件. 即只需要保证关节速度在运动时间内恒为正或者恒为负, 当速度大于零时位置轨迹为单调递增状态, 当速度小于零时位置轨迹为单调递减状态. 因此保证关节位置轨迹满足其约束范围的条件为

$$\dot{x}(t_\alpha) \geq 0 \text{ 或 } \dot{x}(t_\alpha) \leq 0 \Leftrightarrow \text{Rand}(t_\alpha) \geq 0 \text{ 或 } \text{Rand}(t_\alpha) \leq 0. \quad (17)$$

对式(15)求导可得

$$\begin{aligned}
\text{Rand}(t_\alpha) = & \left(30 - \frac{15t_{\text{motion}}\dot{x}_0}{S} - \frac{15t_{\text{motion}}\dot{x}_f}{S} - \frac{2.5t_{\text{motion}}^2\ddot{x}_0}{S} + \right. \\
& \left. \frac{2.5t_{\text{motion}}^2\ddot{x}_f}{S} \right) t_\alpha^4 + \left(-60 + \frac{32t_{\text{motion}}\dot{x}_0}{S} + \frac{28t_{\text{motion}}\dot{x}_f}{S} + \right. \\
& \left. \frac{6t_{\text{motion}}^2\ddot{x}_0}{S} - \frac{4t_{\text{motion}}^2\ddot{x}_f}{S} \right) t_\alpha^3 + \left(30 - \frac{18t_{\text{motion}}\dot{x}_0}{S} - \frac{12t_{\text{motion}}\dot{x}_f}{S} - \right.
\end{aligned}$$

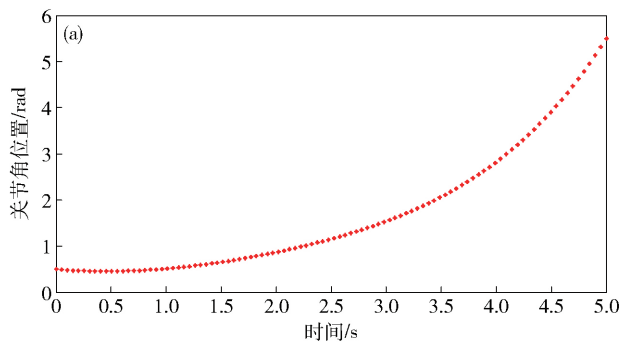
$$\frac{4.5t_{\text{motion}}^2\ddot{x}_0}{S} + \frac{1.5t_{\text{motion}}^2\ddot{x}_f}{S} \Big) t_{\alpha}^2 + \frac{t_{\text{motion}}^2\ddot{x}_0}{S} t_{\alpha} + \frac{t_{\text{motion}}\dot{x}_0}{S}. \quad (18)$$

对于式(18) $\text{Rand}(t_{\alpha})$ 为一个关于 t_{α} 的四次多项式, 由于 $0 \leq t_{\alpha} \leq 1$, 为保证 $\text{Rand}(t_{\alpha})$ 在区间 $[0, 1]$ 内恒为正或恒为负, 则其零点必须在 $[0, 1]$ 之外, 由于 \dot{x}_0, \dot{x}_f 和 S 均为已知的关节状态常量, 因此当 $x_f > x_0$ 位置函数为增函数时可令式(18) 大于 0 求解出 t_{motion} 的范围, 当 $x_f < x_0$ 位置函数为减函数时可令式(18) 小于 0 求解出 t_{motion} 的范围. 在 t_{motion} 的范围内选取其最优值以获得满足位置约束条件的关节最优轨迹. 若将上述两种情况归纳为一种统一的形式, 可得关节轨迹运动最优时间所满足的条件为式(19). 结合式(18) 可将式(19) 并代入边界条件参数可得关于 t_{motion} 的不等式, 同样易求得最优 t_{motion} 的取值范围.

$$\text{Rand}(0) \times \text{Rand}(1) \geq 0. \quad (19)$$

3.3 双作业臂多关节轨迹优化

带电检修机器人的双作业臂由旋转、伸缩、横移和纵移共七个关节构成, 通过各关节的轨迹运动规划使得双作业臂及其末端由初始位姿运动到螺栓螺母对准状态, 为保证各关节位置轨迹满足其约束条件, 利用关节运动时间最优轨迹规划原理对各关节的运动时间进行优化处理以获得各关节最优运动轨迹. 为提高作业效率, 各关节为联动模式, 由于作业内容和对象已经确定, 要求各关节同时到达目标点, 而各关节的起始时刻是相同的, 所以对于双作业臂各关节其运动时间是相同的, 即对七个关节设定一个相同的运动时间. 然而由于机械特性及关节电机的驱动能力等因素, 各关节各有一个独立的最优执行时间范围, 因此可对各关节独立最优执行时间取交集以获得各关节整体最优执行时间, 设各关节独立执行时间约束范围为式(20), 取各关节独立执行时间的交集可得各关节整体最优执行时间 t_{best} , 应满足式(21). 根据各关节的初始条件以及 t_{best} 可得双臂各关节满足位置约束的最优运动轨迹规划.



$$t_{\text{motion}(i)(\min)} \leq t_{\text{motion}(i)} \leq t_{\text{motion}(i)(\max)} \quad i=0, 1, \dots, 7. \quad (20)$$

$$\text{Max}(t_{\text{motion}(i)(\min)}) \leq t_{\text{best}} \leq \text{Min}(t_{\text{motion}(i)(\max)}) \quad i=1, 2, \dots, 7. \quad (21)$$

4 仿真实验与现场运行

4.1 仿真实验

设关节起点状态为 $x_0 = 0.5 \text{ rad}$, $\dot{x}_0 = 1.5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $\ddot{x}_0 = 0.52 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$, 终点状态为 $x_f = 5.5 \text{ rad}$, $\dot{x}_f = 2.3 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $\ddot{x}_f = 1.22 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$, 端点时刻为 $[t_0 = 0 \text{ s}, t_f = 5 \text{ s}]$. 常规算法与改进算法的轨迹运动仿真结果对比如图 3 所示. 其中常规五次多项式插值关节轨迹规划曲线如图 3(a) 所示; 将端点时刻映射到 $[0, 1]$ 区间范围后, 改进五次多项式插值关节轨迹规划曲线如图 3(b) 所示. 保持原有的关节状态不变, 在保证关节运动时间不变的前提下选取端点时刻为 $[t_0 = 1.5 \text{ s}, t_f = 6.5 \text{ s}]$, 利用改进算法获得的关节轨迹如图 4(b) 所示. 由仿真结果可知改进算法和常规算法轨迹规划曲线完全相同, 仅仅只是坐标轴横轴的刻度不同, 因此改进算法完全可以实现常规算法的功能. 另外, 改进算法在选取不同端点时刻时轨迹规划曲线也是完全相同的, 验证了改进算法只与端点状态及执行时间有关, 而与端点时刻无关. 当端点时刻发生改变后只需将关节轨迹与标准化时间的映射关系转换为与物理时间的映射就可以得到新的关节轨迹函数, 提高了算法的实用性.

对于原有的关节状态, 通过人工设置关节运动时间和经过优化关节运动时间仿真结果对比如图 5 所示. 其中人工设定关节运动时间 $t_{\text{motion}} = 1 \text{ s}$. 利用改进算法关节轨迹如图 5(a) 所示; 利用优化后的执行时间 $t_{\text{motion}} = 0.9 \text{ s}$ 改进算法获得的关节轨迹如图 5(b) 所示. 通过仿真结果可知: 当人工设定执行时间时轨迹出现超调, 当轨迹运行时间为 0.72 s 时, 关节轨迹已经运动到达指定位置, 这样会造成在剩余时间里关节产生额外运动, 甚至位置超出其约束范围; 而经过算法优化得到轨迹运行时间, 关节轨迹在 $t_{\text{motion}} = 0.9 \text{ s}$ 时刻恰好到达指定位置, 避免了超调的发生, 提高了关节的运动效率.

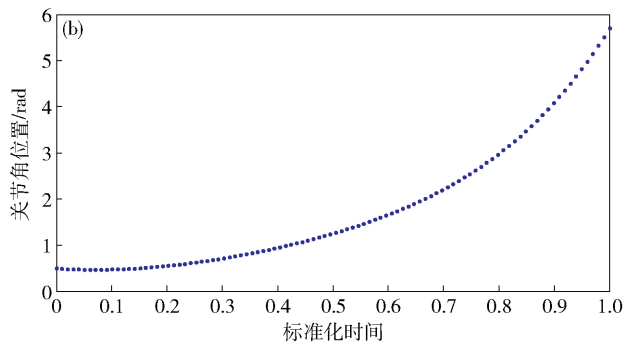


图 3 常规算法(a)和改进算法(b)关节轨迹曲线

Fig. 3 Joint trajectory curves of the conventional algorithm (a) and the improved algorithm (b)

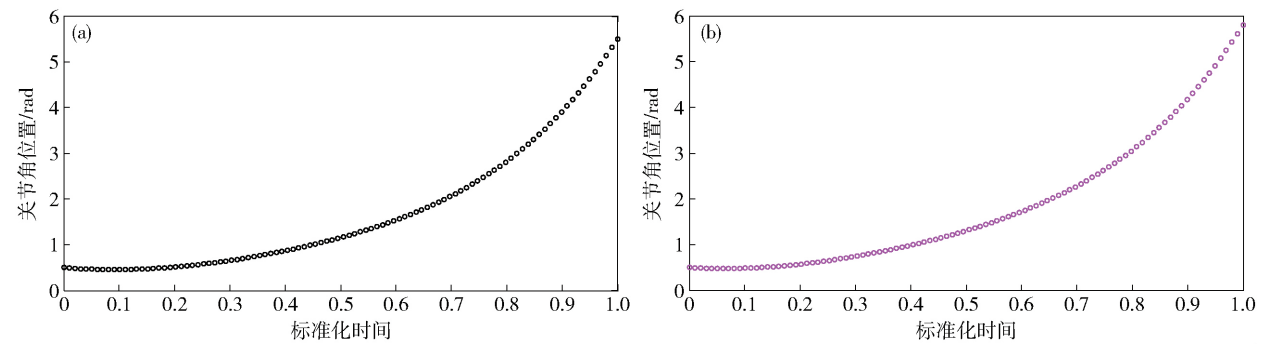


图 4 不同端点时刻关节轨迹曲线. (a) $t_0 = 0, t_f = 5 \text{ s}$; (b) $t_0 = 1.5 \text{ s}, t_f = 6.5 \text{ s}$
Fig. 4 Joint trajectory curves at different endpoint times: (a) $t_0 = 0, t_f = 5 \text{ s}$; (b) $t_0 = 1.5 \text{ s}, t_f = 6.5 \text{ s}$

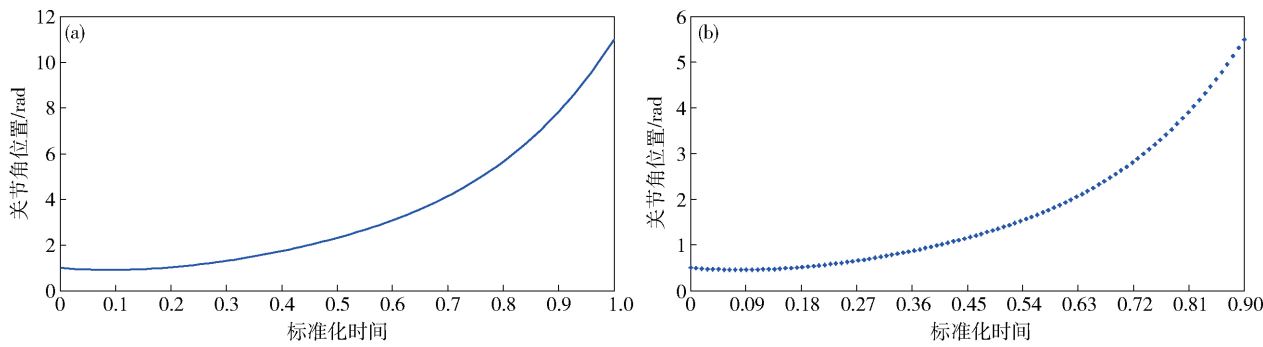


图 5 不同运动行时间关节轨迹曲线. (a) 人工设定 $t_{\text{motion}} = 1 \text{ s}$; (b) 算法优化 $t_{\text{motion}} = 0.9 \text{ s}$
Fig. 5 Joint trajectory curves at different motion times: (a) set value $t_{\text{motion}} = 1 \text{ s}$; (b) optimized value $t_{\text{motion}} = 0.9 \text{ s}$

4.2 现场作业试验

为进一步验证改进算法的有效性及其优越性,在现场线路上进行带电检修机器人的作业试验,用常规算法和改进算法对机器人双作业臂进行轨迹优化,进行两次拧

螺栓试验,分别记录双臂的运行状态.通过各关节的运动规划,双作业臂由初始位姿到双臂实现引流板螺栓螺母对准对接位姿如图 6 所示,其中常规算法与改进算法作业臂 1 和作业臂 2 的轨迹运行状态如表 1 所示.

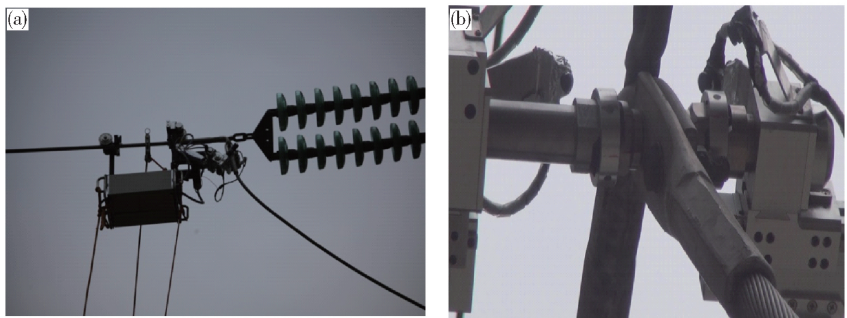


图 6 带电检修机器人现场运行. (a) 初始状态; (b) 对准状态
Fig. 6 Field operation test of the robot: (a) initial state; (b) alignment state

表 1 作业臂运行状态对比表

Table 1 Comparison of robot operation states

性能参数	作业手 1		作业手 2	
	常规 算法	改进 算法	常规 算法	改进 算法
仿真关节运动收敛时间/s	1.2	0.8	1	0.8
现场试验定位到作业对象时间/s	102	86	124	98
平均对准逼近精度/%	90	95	88	98

通过现场作业试验机器人各关节协调运动,双作业臂由初始状态进入到工作状态,再到螺栓螺母对准对接状态.整个过程机器人双作业臂及其末端各关节动作流畅、连续且平稳.由表 1 不同方法及不同被控作业臂在仿真与现场试验环境下的算法收敛速度可知:对于作业臂 1 仿真实验关节运动收敛时间,改进算法提升 0.4 s.实际运动作业臂 1 末端由初始位姿运动到螺栓头对准位姿所耗费的时间缩短 16 s;对于作业

臂2仿真实验关节运动收敛时间,改进算法提升0.2 s,实际运动作业臂2末端由初始位姿运动到螺母对准位姿所耗费的时间缩短26 s。因此不论是何种工况下,改进算法的收敛速度均快于常规算法。此外,为进一步量化末端与螺栓头及螺母的对准效果,在不同算法不同作业对象中引入平均对准逼近精度的性能指标。由表1可知:改进算法的平均对准逼近精度为98%和95%,均高于常规算法,由于作业末端套筒具有柔性关节和一定自适应容错能力,允许误差在5%以内均可以实现末端与作业对象的对接,因此改进算法完全能够满足对准对接要求;而常规算法由于平均对准逼近精度相对较低,有可能出现末端与作业对象无法对接的现象,这样需要再次人工干预调节双臂位姿,以提高对准逼近精度,实现成功对接,由于常规算法需要人工干预对准对接过程,在一定程度上降低作业效率。由此可见,改进多项式插值关节轨迹规划方法具有较强的工程实用性,进一步提高作业效率,提高末端与作业对象对准对接的可靠性,并且一定程度上体现了机器人作业的智能性。

5 结论

(1) 研制出面向高压输电线路引流板螺栓紧固的带电检修机器人试验样机。

(2) 通过对轨迹时间变量的Min-Max标准化处理,改进多项式插值算法轨迹仅仅只与轨迹端点状态和执行时间有关,而与端点时刻无关,提高了算法的实用性。

(3) 通过轨迹运动时间的优化,有效避免关节轨迹超调的发生,提高了关节运动的效率,同时满足轨迹状态全局约束要求,避免作业事故的发生。

(4) 现场作业试验进一步验证了改进算法的工程实用性。

参 考 文 献

- [1] Hu Y. Research and development of live working technology on transmission and distribution lines. *High Voltage Eng*, 2006, 32(11): 1
(胡毅. 输配电线路带电作业技术的研究与发展. 高电压技术, 2006, 32(11): 1)
- [2] Lu S Y, Ma P S, Qi H, et al. Research on high voltage electric power live line working robot. *Autom Electr Power Syst*, 2003, 27(17): 56
(鲁守银, 马培荪, 戚晖, 等. 高压带电作业机器人的研制. 电力系统自动化, 2003, 27(17): 56)
- [3] Lu S Y, Li Y P, Qi W. Robotic live-working for electric power lines maintenances // *ICIEA 2009, 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. Xi'an, 2009: 1716
- [4] Chithamacharyulu P V, Sashanka D P, Kiran G U, et al. Design of automated hotline maintenance robot using haptic technology. *Int J Sci Res Publ*, 2014, 4(1): 533
- [5] Singh J, Gandhi K, Kapoor M, et al. New approaches for live wire maintenance of transmission lines. *MIT Int J Electr Instrum Eng*, 2013, 3(2): 67
- [6] Song Y F, Wang H G, Jiang Y, et al. AApe-D: a novel power transmission line maintenance robot for broken strand repair // *The 2nd International Conference on Applied Robotics for the Power Industry (CARPI 2012)*. Zurich, 2012: 117
- [7] Zhan W W, Wang W, Chen N C, et al. Path planning strategies for UAV based on improved A* algorithm. *Geomat Inf Sci Wuhan Univ*, 2015, 40(3): 315
(占伟伟, 王伟, 陈能成, 等. 一种利用改进A*算法的无人机航迹规划. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(3): 315)
- [8] Jin M J, Lou Y J, Liu G F, et al. A novel motion planning algorithm with adaptive dynamic collision detection for industrial robots. *J Univ Sci Technol China*, 2012, 42(6): 448
(金明杰, 楼云江, 刘冠峰, 等. 基于自适应动态碰撞检测的工业机器人运动规划算法研究. 中国科学技术大学学报, 2012, 42(6): 448)
- [9] Wang K M, Zhao Y F, Hou S P, et al. Dynamic obstacle avoidance for unmanned underwater vehicle based on an improved artificial potential field. *CAAI Trans Intell Syst*, 2014, 9(1): 47
(王奎民, 赵玉飞, 候恕萍, 等. 一种改进人工势场的UUV障碍物航迹规避方法. 智能系统学报, 2014, 9(1): 47)
- [10] Liu J F, Chen K, Su Q Q, et al. Markov game based 3D path planning for palletizing robot. *China Mech Eng*, 2012, 23(7): 851
(刘久富, 陈魁, 苏青琴, 等. 基于Markov对策的码垛机器人三维路径规划. 中国机械工程, 2012, 23(7): 851)
- [11] Feng A S, Wang Q H, Ge X Y. Trajectory planning of the live-line maintenance robot manipulator // *2nd International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT-2012)*. Shenyang, 2012: 2089
- [12] Guan Y S, Yokoi K, Stasse O, et al. On robotic trajectory planning using polynomial interpolations // *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2005)*. Shenzhen, 2005: 111
- [13] Wang X, Wang J W, Rao Z. An adaptive parametric interpolator for trajectory planning. *Adv Eng Software*, 2010, 41(2): 180
- [14] Zhang C, Li Q, Dong J Y. Switch strategy based on chaos particle swarm optimization and specialized genetic algorithm for path planning of mobile robots. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2013, 35(6): 826
(张超, 李擎, 董冀媛, 等. 基于混沌粒子群-专用遗传算法切换策略的移动机器人路径规划. 北京科技大学学报, 2013, 35(6): 826)
- [15] Fahham H R, Farid M, Khooran M. Time optimal trajectory tracking of redundant planar cable-suspended robots considering both tension and velocity constraints. *J Dyn Syst Meas Control*, 2011, 133(1): 011004
- [16] Haddad M, Khalil W, Lehtihet H E. Trajectory planning of unicycle mobile robots with a trapezoidal-velocity constraint. *IEEE Trans Rob* 2010, 26(5): 954.