

## 基于 Tau-jerk 策略的机器人运动轨迹规划

李峰, 张晓, 侯伟, 秦晓飞, 常敏

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

**摘要:** **目的** 为了提高包装的效率, 满足大量包装的需要, 设计基于 Tau-jerk 运动策略的轨迹规划控制六自由度机器人运动的方法。**方法** 首先对 Tau-jerk 运动策略进行理论分析。然后, 通过仿真得出六自由度机器人的速度、加速度曲线光滑连续, 加速度的导数也连续, 且起点和终点的速度、加速度都为 0, 并与五次多项式插值法进行对比得到更加平滑的速度、加速度曲线, 驱动力矩更小。再以时间优化为目标, 采用自适应遗传算法对生成的轨迹进行优化。**结果** 机械臂总的运动时间由原来的 12 s 缩短到了 7.058 s, 时间缩短了 41.18%, 达到了优化效果。**结论** 通过在 KUKA Youbot 机器人实验平台上进行实验验证, 证实该方法可以提高包装效率。

**关键词:** Tau-jerk 策略; 六自由度机器人; 轨迹规划; 自适应遗传算法

**中图分类号:** TB486; TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)15-0135-11

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.15.021

## Robot Trajectory Planning Based on Tau-jerk Strategy

LI Feng, ZHANG Xiao, HOU Wei, QIN Xiao-fei, CHANG Min

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**ABSTRACT:** The work aims to design a trajectory planning method based on Tau-jerk motion strategy to control the motion of six-degree-of-freedom robot, so as to improve the efficiency of packaging and meet the needs of mass packaging. First of all, a theoretical analysis on Tau-jerk motion strategy was done. Then, the velocity and acceleration curves of the 6-DOF robot obtained by simulation were smooth and continuous. The derivative of the acceleration was also continuous, and the velocity and acceleration at starting point and ending point were zero. By comparing with the fifth order polynomial interpolation method, the smoother velocity and acceleration curves were obtained and the drive torque was smaller. Taking the time optimization as the goal, the adaptive genetic algorithm was applied to optimize the generated trajectory. The total motion time of the manipulator was reduced from 12 s to 7.058 s, and the time was shortened by 41.18%, which achieved the optimization effect. Validated on the experimental platform of KUKA Youbot robot, the proposed method can improve the packaging efficiency.

**KEY WORDS:** Tau-jerk strategy; 6-DOF robot; trajectory planning; adaptive genetic algorithm

过去包装主要依靠人力作业的人海战术, 进入大量生产、大量消费时代以后, 包装机械化也就应运而生<sup>[1-3]</sup>, 六自由度机器人不仅可以代替人进行工作, 而且在操作精度、速度等方面更优于人的手臂<sup>[4-6]</sup>, 因此, 研究六自由度机器人的轨迹规划, 使其在运动过程中拥有更高的工作精度和运动平稳度, 对于提高包装质量

与效率有着重要的意义。

近几年, 对于轨迹规划的研究, 大多采用几何曲线插值的方法进行轨迹生成<sup>[7-9]</sup>, 如多项式插值、B样条曲线插值等。通常情况下, 采用三次多项式曲线插值法无法保证加速度的连续性和平滑性, 五次多项式可以满足理想加速度的要求, 但计算量又大<sup>[10-11]</sup>。

收稿日期: 2018-04-20

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFF0101400); 国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ150087)

作者简介: 李峰 (1983—), 男, 博士, 上海理工大学硕导, 主要研究方向为机器视觉与人工智能。

通信作者: 秦晓飞 (1982—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为机器视觉与人工智能。

Baumli B 等<sup>[8]</sup>采用样条曲线插值来进行轨迹的生成。样条曲线插值控制点多,计算量大,不利于程序实现。Lippiello V 等<sup>[9]</sup>提出了基于 jerk 值限制的分段 4 次多项式的关节空间轨迹规划方法。这些方法都要耗费很多时间来确保轨迹曲线平滑<sup>[4-6]</sup>,因此,针对以上不足,文中设计一种基于 Tau-jerk 策略的六自由度机器人轨迹规划方法。

## 1 轨迹规划原理

### 1.1 Tau-jerk 运动策略的分析

广义 Tau 理论中, Tau 变量的定义为:

$$\tau(t) = \frac{x(t)}{\dot{x}(t)} \quad (1)$$

式中:  $x(t)$  为任意  $t$  时刻运动间距;  $\dot{x}(t)$  为任意时刻  $t$  的运动间距变化率。

对于六自由度机器人的运动,要保持六自由度机器人末端的位置运动和姿态运动同时闭合,两者耦合关系可表示为:

$$\tau_y(t) = k_{xy} \tau_x(t) \quad (2)$$

式中:  $k_{xy}$  为位置间距  $y(t)$  关于姿态间距  $x(t)$  的耦合因子。

六自由度机器人的运动总是从静止的状态出发,先经历一段加速和减速运动,最后停止在终点位置。由于传统的 Tau-g 引导策略其内部采用恒加速度( $g$ )运动与外部运动闭合,始终受到重力加速度的影响,其二阶导数为常数,会导致初始加速度、力/力矩都不为 0,不能满足六自由度机器人轨迹运动的要求,因此,在此基础上采用了 Tau-jerk 运动策略,基于 Tau-jerk 运动策略的轨迹规划内部采用恒加加速度(jerk)运动与外部运动闭合,而加速度是 jerk 的积分与时间有关,初始时刻  $t=0$  时,其初始加速度、力/力矩都为 0,生成的速度、加速度、力/力矩曲线光滑连续,满足六自由度机器人轨迹规划的要求。Tau-jerk 运动策略的表达式可以表示为:

$$\begin{cases} x_j(t) = \frac{1}{6} j(t_j^3 - t^3) \\ \dot{x}_j(t) = -\frac{1}{2} j t^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $j$  为 jerk 值;  $t_j$  为运动时间。

联立式(1),式(3)可得:

$$\tau_j(t) = \frac{x_j(t)}{\dot{x}_j(t)} \quad (4)$$

最终可得六自由度机器人末端的位置、速度、加速度方程:

$$\begin{cases} x(t) = \frac{x_0}{t_j^{3/k_{xy}}} (t_j^3 - t^3)^{\frac{1}{k_{xy}}} \\ \dot{x}(t) = \frac{-3x_0 t^2}{k_{xy} t_j^{2/k_{xy}}} (t_j^3 - t^3)^{\frac{1}{k_{xy}}-1} \\ \ddot{x}(t) = \frac{3x_0 t}{k_{xy} t_j^{k_{xy}}} \left( \frac{3-k_{xy}}{k_{xy}} t^3 - 2t_j^3 \right) (t_j^3 - t^3)^{\frac{1-2k_{xy}}{k_{xy}}} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $k_{xy}$  为耦合因子。

耦合因子  $k_{xy}$  是自定义设置的一个常数,决定着机器人的运动轨迹规(包括运动速度和加速度),  $k_{xy}$  的值越大,则峰值速度越延迟,减速阶段越短,最后的减速度越大。为进一步验证耦合因子  $k_{xy}$  对机器人运动轨迹规划的影响,文中分别对  $k_{xy}$  取不同的值( $k_{xy}=-0.4, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.2$ ),  $x$ ,  $\dot{x}$  和  $\ddot{x}$  的变化曲线见图1。分析式(5),可得不同  $k_{xy}$  的运动结果见表1。

表 1 不同  $k_{xy}$  的运动结果分析  
Fig.1 Motion result analysis with different  $k_{xy}$

$k_{xy}$	$t$	$x$	$\dot{x}$	$\ddot{x}$	最后状态
$k_{xy} < 0$	$\rightarrow t_j$	$\rightarrow \infty$	$\rightarrow \infty$	$\rightarrow \infty$	间距不能闭合
$k_{xy} = 0$	$\rightarrow t_j$	$X$	$X$	$X$	$X$
$0 < k_{xy} < 0.5$	$\rightarrow t_j$	$\rightarrow 0$	$\rightarrow 0$	$\rightarrow 0$	平稳闭合
$k_{xy} = 0.5$	$\rightarrow t_j$	$\rightarrow 0$	$X$	$X$	$X$
$0.5 < k_{xy} < 1$	$\rightarrow t_j$	$\rightarrow 0$	$\rightarrow 0$	$\rightarrow \infty$	轻微碰撞
$k_{xy} = 1$	$\rightarrow t_j$	$\rightarrow 0$	$\rightarrow 0$	$X$	$X$
$k_{xy} > 1$	$\rightarrow t_j$	$\rightarrow 0$	$\rightarrow \infty$	$\rightarrow \infty$	强烈碰撞

注:  $X$  表示无解

由表1可得  $k_{xy}$  对轨迹规划的影响:

1) 若  $k_{xy} < 0$ , 则当  $t \rightarrow t_j$  时,  $x \rightarrow \infty$ ,  $\dot{x} \rightarrow \infty$ ,  $\ddot{x} \rightarrow \infty$ 。在实际系统中,  $\ddot{x}$  不会无穷大,但  $x$  和  $\dot{x}$  仍会保持最大的数值,故间距  $x$  不能闭合。

2) 若  $k_{xy} = 0$ , 则当  $t \rightarrow t_j$  时,  $x \rightarrow X$ ,  $\dot{x} \rightarrow X$ ,  $\ddot{x} \rightarrow X$ 。则  $x$ ,  $\dot{x}$  和  $\ddot{x}$  都不为 0。

3) 若  $0 < k_{xy} < 0.5$ , 则当  $t \rightarrow t_j$  时,  $x \rightarrow 0$ ,  $\dot{x} \rightarrow \infty$ ,  $\ddot{x} \rightarrow 0$ 。因此  $x$ ,  $\dot{x}$  和  $\ddot{x}$  将在同一时刻变为 0, 间距  $x$  可平稳闭合。

4) 若  $k_{xy} = 0.5$ , 则当  $t \rightarrow t_j$  时,  $x \rightarrow 0$ ,  $\dot{x} \rightarrow X$ ,  $\ddot{x} \rightarrow X$ , 即  $x$  闭合时, 间距速度与间距加速度都不为 0。

5) 若  $0.5 < k_{xy} < 1$ , 则当  $t \rightarrow t_j$  时,  $x \rightarrow 0$ ,  $\dot{x} \rightarrow 0$ ,  $\ddot{x} \rightarrow \infty$ 。在实际系统中  $\ddot{x}$  不会无穷大而只能达到一个最大值, 因此当间距  $x$  闭合时加速度不为 0。

6) 若  $k_{xy} = 1$ , 间距为恒 jerk 运动。则当  $t \rightarrow t_j$  时,  $x \rightarrow 0$ ,  $\dot{x} \rightarrow 0$ ,  $\ddot{x} \rightarrow X$ , 即  $x$  闭合时, 间距加速度不为 0。

7) 若  $k_{xy} > 1$ , 则当  $t \rightarrow t_j$  时,  $x \rightarrow 0$ ,  $\dot{x} \rightarrow \infty$ ,  $\ddot{x} \rightarrow \infty$ 。实际系统中  $\ddot{x}$  只能达到一个最大值, 间距  $x$  的闭合过程将是加速过程。

由图1和表1分析可知, 在  $0 < k_{xy} < 0.5$  区间, 当  $t \rightarrow t_j$

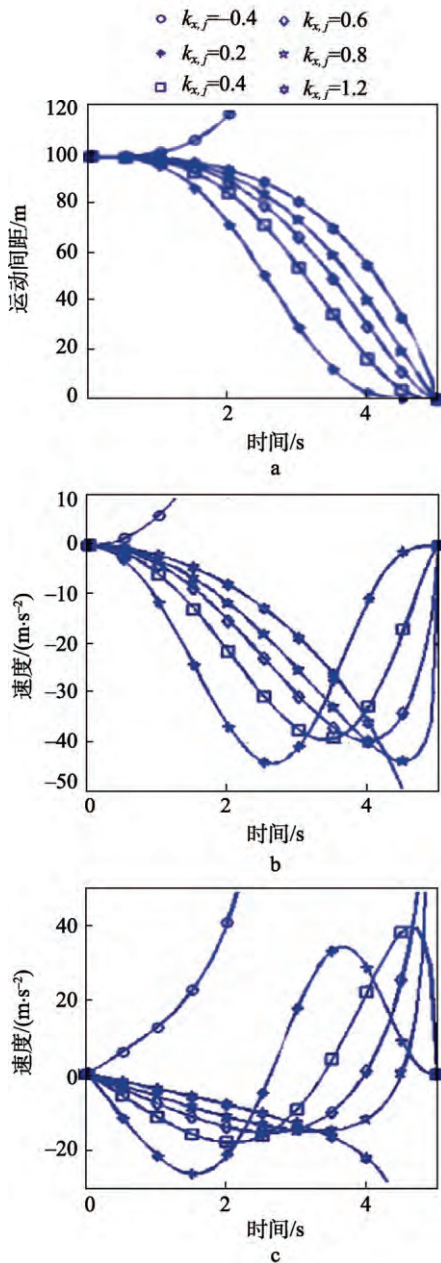


图 1 不同  $k_{xj}$  时  $x$ ,  $\dot{x}$  和  $\ddot{x}$  随时间的变化曲线  
Fig.1 Curve of  $x$ ,  $\dot{x}$  and  $\ddot{x}$  changing with time with different  $k_{xj}$  values

时, 速度和加速度均趋向 0, 可以实现平稳闭合, 符合六自由度机器人轨迹规划的要求, 并且  $k_{xj} = 0.4$  时, 所得的速度、加速度曲线最平稳光滑。

## 1.2 基于 Tau-jerk 运动策略的轨迹规划

轨迹规划<sup>[13]</sup>研究六自由度机器人的主要目的, 其关键在于规划出一条准确、快速且有效的最优路径以完成给定任务, 提高包装的效率。虽然在初始点和目标点之间存在多条轨迹, 但对于六自由度机器人末端来说, 其运动曲线近似为直线。理想的轨迹曲线及其速度、加速度都是光滑、连续且有界, 且初始点和目标点处的速度、加速度都为 0。此处采用 Tau-jerk 运动策略作为轨迹生成方法。

轨迹规划中心思想: 在笛卡尔空间中, 给出了六自由度机器人末端轨迹运动的初始点、目标点和姿态等信息, 根据轨迹规划方法规划出运动轨迹。由于对六自由度机器人的控制是在关节空间中通过电机控制各关节的转角来实现的, 所以再通过逆运动学求解, 求得关节空间的运动。

### 1.2.1 笛卡尔空间位置轨迹规划

定义位置矢量为:

$$l(t) = r(t_j) - r(t) \quad (6)$$

当  $t=0$  时, 则  $l_0 = r(T_j) - r_0$ 。由式 (5) 和式 (6) 得笛卡尔空间位置方程为:

$$\begin{cases} r(t) = r(t_j) - \frac{l_0}{3} (t_j^3 - t^3)^{\frac{1}{k_{xj}}} \\ \dot{r}(t) = \frac{3l_0}{3} t^2 (t_j^3 - t^3)^{\frac{1}{k_{xj}} - 1} \\ \ddot{r}(t) = \frac{-3l_0 t (t_j^3 - t^3)^{\frac{1}{k_{xj}} - 2}}{k_{xj} t_j^{\frac{3}{k_{xj}}}} \left( \left( \frac{3}{k_{xj}} - 1 \right) t^3 - 2t_j^3 \right) \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $k_{xj}$  位置间距的耦合因子, 取  $0 < k_{xj} < 0.5$ 。

### 1.2.2 笛卡尔空间姿态轨迹规划

定义  $\underline{A}^{su}$  是  $\underline{e}^u$  关于  $\underline{e}^s$  的方向余弦矩阵, 则

$$\underline{A}^{su} = \underline{A}_0^T \underline{A}_{id} \quad (8)$$

根据欧拉刚体转动定理,  $\underline{\rho}$  为绕固定轴旋转的单位矢量,  $\theta(t)$  为任意时刻  $t$  绕固定轴从初始状态开始旋转的角度。方向余弦矩阵和转动张量的坐标阵相等, 即:

$$\underline{A}^{su} = \cos \theta(t_j) \underline{I}_6 + (1 - \cos \theta(t_j)) \underline{\rho} \underline{\rho}^T + \sin \theta(t_j) \tilde{\underline{\rho}} \quad (9)$$

式中:  $\underline{I}_6$  为 3 阶单位阵;  $\underline{\rho}$ ,  $\tilde{\underline{\rho}}$  为在基  $\underline{e}^s$  中的坐标阵和坐标方阵。

由式 (8) 和式 (9) 可求得  $\underline{\rho}$  和  $\theta(t_j)$ , 因此, 姿态间距为:

$$\phi(t) = \theta(t_d) - \theta(t) \quad (10)$$

联立式 (5) 和式 (10) 可得:

$$\begin{cases} \theta(t) = \theta(t_j) - \frac{\theta(t_j)}{3} (t_j^3 - t^3)^{\frac{1}{k_{aj}}} \\ \dot{\theta}(t) = \frac{3\theta(t_j)}{3} t^2 (t_j^3 - t^3)^{\frac{1}{k_{aj}} - 1} \\ \ddot{\theta}(t) = \frac{-3\theta(t_j) t (t_j^3 - t^3)^{\frac{1}{k_{aj}} - 2}}{k_{aj} t_j^{\frac{3}{k_{aj}}}} \left( \left( \frac{3}{k_{aj}} - 1 \right) t^3 - 2t_j^3 \right) \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $k_{aj}$  为姿态间距的耦合因子, 取  $0 < k_{aj} < 0.5$ 。

方向余弦矩阵  $\mathbf{A}^{sb}$  相对于  $\mathbf{e}^s$  可表示为

$$\mathbf{A}^{sb} = \cos\theta \mathbf{I}_3 + (1 - \cos\theta) \underline{\rho\rho}^T + \sin\theta \underline{\tilde{\rho}} \quad (12)$$

由前述得到六自由度机器人末端姿态的运动方程为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{A}} = \mathbf{A}_0 \mathbf{A}^{sb} \\ \dot{\underline{\omega}} = \mathbf{A}_0 \underline{\rho} \dot{\theta} \\ \dot{\underline{\theta}} = \mathbf{A}_0 \underline{\rho} \ddot{\theta} \end{cases} \quad (13)$$

### 1.3 轨迹优化

规划出来的轨迹并不是最适合当前工业机器人的最优轨迹,仍需要根据其特定任务进行优化。目前,基于时间的优化研究在工业机器人的优化算法中占据主流,它需要在保证机械臂运动约束和运动平稳性的基础上,寻求出最优时间序列,使得机械臂能够以最短的时间完成任务,因此本节从时间最优的角度出发,采用改进的遗传算法对轨迹进行优化。

#### 1.3.1 轨迹规划问题

对于求函数最大值(或最小值)的优化问题,其数学规划模型可表示为:

$$\begin{cases} \max f(X) \\ X \in R \\ R \subseteq U \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $X$  为决策变量,  $X=[x_1 \ x_2 \dots x_n]^T$ ;  $f(X)$  为目标函数;其余两式为约束条件,  $U$  为基本空间;  $R$  为  $U$  的一个子集,  $R$  称为可行解集合,即满足约束条件的解  $X$  的集合。

对于机械臂复杂系统的轨迹优化,假设机械臂从初始点到目标点的运动过程中需要经过  $n$  个路径点,则有  $n-1$  个时间间隔,见式(15)。

$$T_i = t_{i+1} - t_i \quad (15)$$

式中:  $T_i$  为由第  $i$  个路径点运动到第  $i+1$  个路径点所用的时间;  $t_i$  为机械臂运动到第  $i$  个路径点的时间;  $t_{i+1}$  为机械臂运动到第  $i+1$  个路径点的时间。

则总的运动时间可表示为:

$$T = T_1 + T_2 + \dots + T_{i-1} = \sum_{i=1}^{n-1} T_i \quad (16)$$

式中:  $T$  为由第 1 个路径点一直运动到第  $n$  个路径点的运动时间总和;  $T_i$  ( $i=1,2,3,\dots,n-1$ ) 为各路径点之间的运动时间间隔。

时间  $T$  作为目标函数,变量为时间间隔  $T_i$  ( $i=1,2,3,\dots,n-1$ ),约束条件为机械臂各个关节的最大允许速度、加速度的绝对值。具体描述如下所述。

目标函数和约束条件分别为:

$$\min T = \sum_{i=1}^{n-1} T_i \quad (17)$$

$$\begin{cases} |\dot{\theta}(t)| \leq \dot{\theta}_{\max} \\ |\ddot{\theta}(t)| \leq \ddot{\theta}_{\max} \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $\dot{\theta}(t)$ ,  $\ddot{\theta}(t)$  分别为关节的角速度、角加速度;  $\dot{\theta}_{\max}$ ,  $\ddot{\theta}_{\max}$  分别为关节所允许的最大角速度、最大角加速度。

#### 1.3.2 自适应遗传算法轨迹规划

传统的遗传算法有一定的局限性,例如二进制的编码方式在遗传算子的选择、进化上存在不足;轮盘赌的选择方法,其  $P_c$ ,  $P_m$  均为固定值,无法满足实际问题在迭代过程中的动态特性,致使无法贴近种群的进化原型,容易陷入局部最优解<sup>[14]</sup>。针对以上的不足和缺陷,文中采用了自适应遗传算法(AGA)<sup>[15]</sup>来对轨迹规划进行优化。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 在笛卡尔空间中的运动轨迹实验

文中以六自由度机器人为研究对象,通过仿真验证前述轨迹方法的可行性,见图 2。六自由度机器人 D-H 参数以及动力学参数分别见表 2—3。

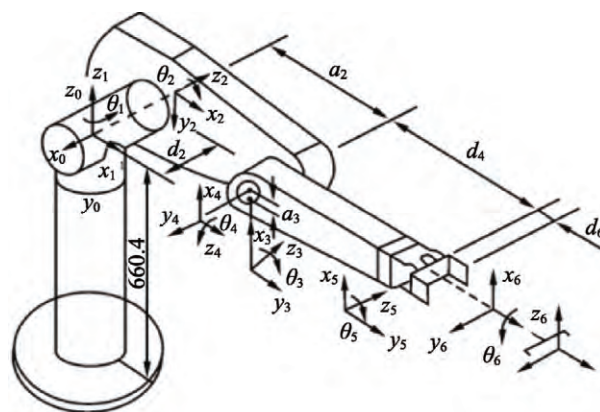


图 2 六自由度机械手及其结构

Fig.2 6-DOF manipulator and its structure

表 2 D-H 参数  
Tab.2 D-H parameter

连杆 $i$	$\theta_i$	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$
1	$\theta_1$	0	0	0
2	$\theta_2$	$-90^\circ$	0	0
3	$\theta_3$	0	0.4318	0.15
4	$\theta_4$	$-90^\circ$	0.0203	0.4318
5	$\theta_5$	$90^\circ$	0	0
6	$\theta_6$	$-90^\circ$	0	0



假设六自由度机器人末端的初始位置为  $r_0 = (0.5 \ 0.2 \ 0.4)^T$ , 目标位置为  $r(T_j) = (0.1 \ 0.5 \ 1)^T$ , 运动时间为  $T_j = 3 \text{ s}$ 。六自由度机器人末端在笛卡尔空间中的运动轨迹近似为一条直线见图 3。

表 3 六自由度机器人动力学参数  
Tab.3 Dynamic parameter of 6-DOF robot

连杆 $i$	质量 $m_i/\text{kg}$	惯量张量 $J_i/(\text{g}\cdot\text{m}^2)$
1	0	diag(0,0.35,0)
2	17.4	diag(0.13, 0.524, 0.539)
3	4.8	diag(0.066, 0.086, 0.0125)
4	0.82	diag(0.0018, 0.0013, 0.0018)
5	0.34	diag(0.0003, 0.0004, 0.0003)
6	0.09	diag(0.00015, 0.00015, 0.0004)

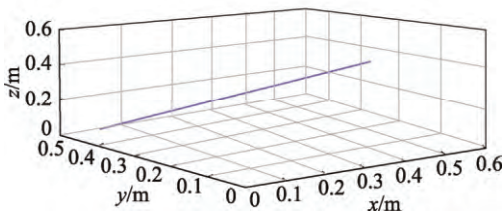


图 3 六自由度机器人末端运动轨迹  
Fig.3 The end motion trajectory of a 6-DOF robot

2.2 各关节的速度和加速度实验

各关节角度、速度、加速度变化见图 4。从图 4 可知, 各关节在初始位置和目标位置的速度、加速度都为 0, 说明六自由度机器人可以平稳的起动且平稳地到达目标点, 速度、加速度曲线光滑连续。

2.3 六自由度与五次多项式插值法对比分析

文中采用 Tau-jerk 策略生成的轨迹规划方法与五次多项式插值法进行比较, 比较结果见图 5—6。图 5 中自上而下、自左向右依次表示六自由度机器人第 1 至第 6 关节的轨迹、速度、加速度曲线, 其中, 第 3 和第 4、第 5 和第 6 曲线基本相似, 这是由于所取纵坐标刻度不同。由图 5 分析可知, 采用 Tau-jerk 策略的轨迹规划方法得到的轨迹曲线连续且比五次多项式插值法得到的轨迹曲线更平滑。关节的驱动力矩曲线见图 6, 可知通过 Tau-jerk 策略得到的各关节驱动力较小, 这意味着末端运动所消耗的能量更小。

2.4 耦合因子对轨迹规划的影响实验

六自由度机器人要实现平稳运动, 耦合因子的取值为  $(0.2, 0.4)$ , 但是, 由于六自由度机器人末端(关节 4, 5, 6)为腕关节, 姿态耦合因子  $k_{aj}$  对轨迹规划的影响很小, 这时只有位置耦合因子  $k_{rj}$  起作用, 因此,

取  $k_{aj}=0.4$ ,  $k_{rj}$  分别取不同值。取  $k_{rj}=k_{aj}=0.4$ , 得到各关节最理想的角度、速度、加速度, 且驱动力矩也最小, 见图 7, 以关节 1 的驱动力矩为例。由图 7 可知, 初始时刻和目标时刻, 关节力矩为 0, 且力矩变化是平滑的。

2.5 运动时间对运动轨迹影响实验

同时, 不同的运动时间也对运动轨迹有着不同的影响, 仿真结果见图 8。当给定运动的初始位置和目标位置, 对于不同的运动时间, 基于 Tau-jerk 运动策略的轨迹规划方法总能规划出光滑、平稳的理想轨迹。

2.6 AGA 算法优化轨迹规划时间实验

AGA 算法中, 采用实数编码方式, 设定种群规模  $N=100$ , 进化代数  $g=100$ ,  $P_{c1}=0.9$ ,  $P_{c2}=0.4$ ,  $P_{m1}=0.1$ ,  $P_{m2}=0.01$ 。结合 Tau-jerk 运动策略的轨迹规划方法, 编写 matlab 脚本程序, 对机械臂的运动轨迹进行时间优化, 优化结果见表 4。

从表中可以看出, 采用基于时间优化的 AGA 算法对轨迹进行优化后, 机械臂总的运动时间由原来的 12 s 缩短到了 7.058 s, 时间缩短了 41.18%, 达到了优化效果。

同时, 利用 Tau-jerk 运动策略的方法对时间最优结果得到的关节轨迹进行仿真验证, 仿真结果见图 9。前 3 个关节的角度、速度以及加速度的曲线见图 9, 从图 9 中可以看出, 经过自适应遗传算法后, 机械臂运动时间缩短到了 7.058 s, 每个关节的曲线都很光滑连续, 且速度、加速度均在约束范围内, 可以实现机械臂平稳高效工作。

表 4 AGA 算法优化结果  
Tab.4 AGA algorithm optimization results s

时间	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	总时间
初始值	3	3	3	3	12
优化结果	2.036	1.403	1.626	1.993	7.058

2.7 KUKA youbot 机器人平台上实验验证

将基于 Tau-jerk 运动策略的轨迹规划方法在 KUKA youbot 机器人平台上进行实验验证, 见图 10。

设定六自由度机器人末端初始位置为  $(0.085 \ -0.195 \ 0.234)$ , 目标位置为  $(-0.019 \ -0.025 \ 0.331)$ , 运行时间  $T_j=3 \text{ s}$ 。分别采用 Youbot 机器人内部轨迹规划算法和基于 Tau-jerk 运动策略的轨迹规划方法进行对比实验, 以前 3 个关节为例, 其位置、速度实验结果分别见图 11。其中, 在采用 Tau-jerk 运动策略时, 取耦合因子  $k_{rj}=k_{aj}=0.4$ 。首先, 在 Youbot 操控终端上进行运动轨迹的规划。其次, 将规划生成的 61 个坐

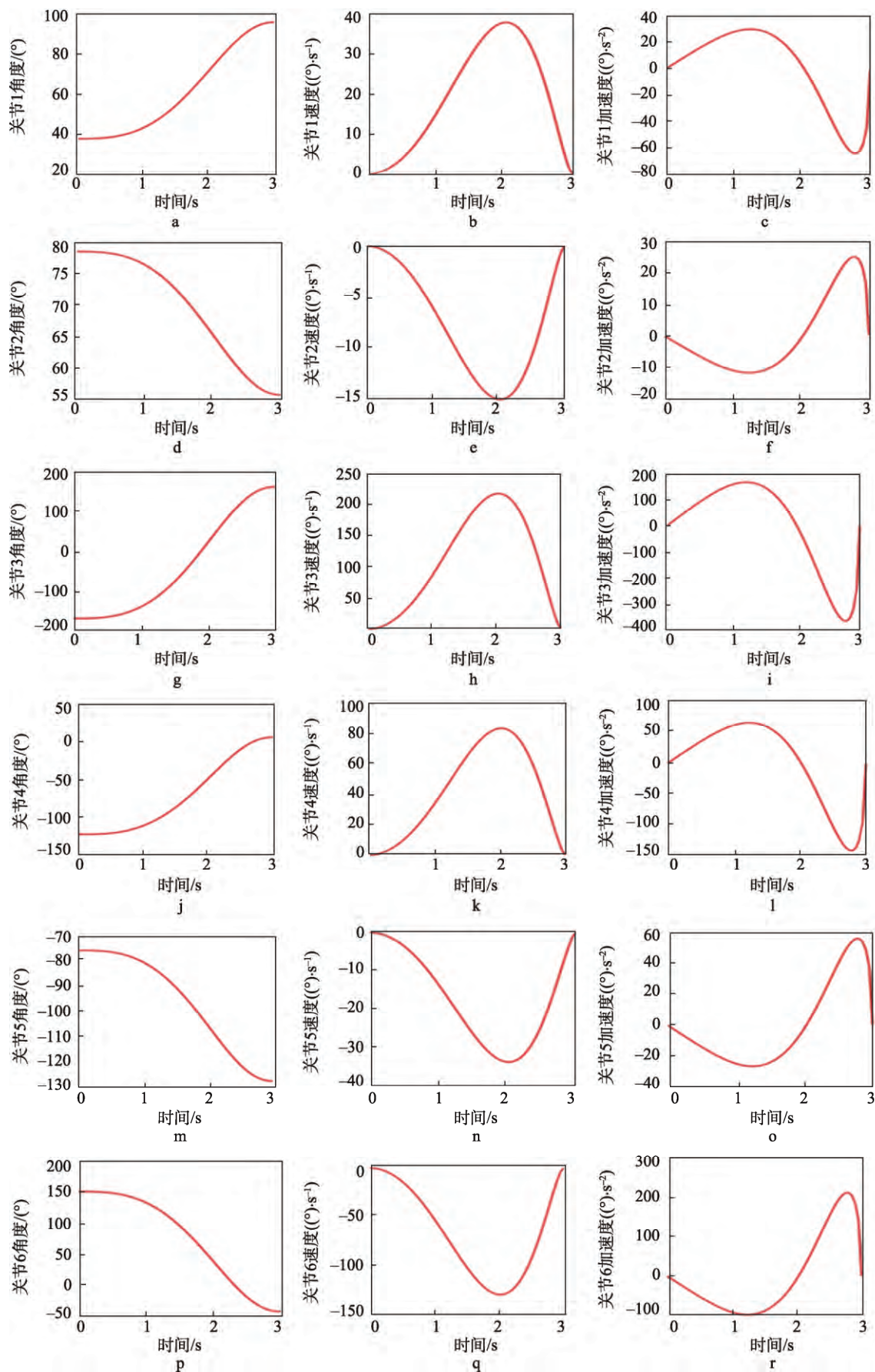


图 4 各关节变化曲线  
Fig.4 Curve of each joint change



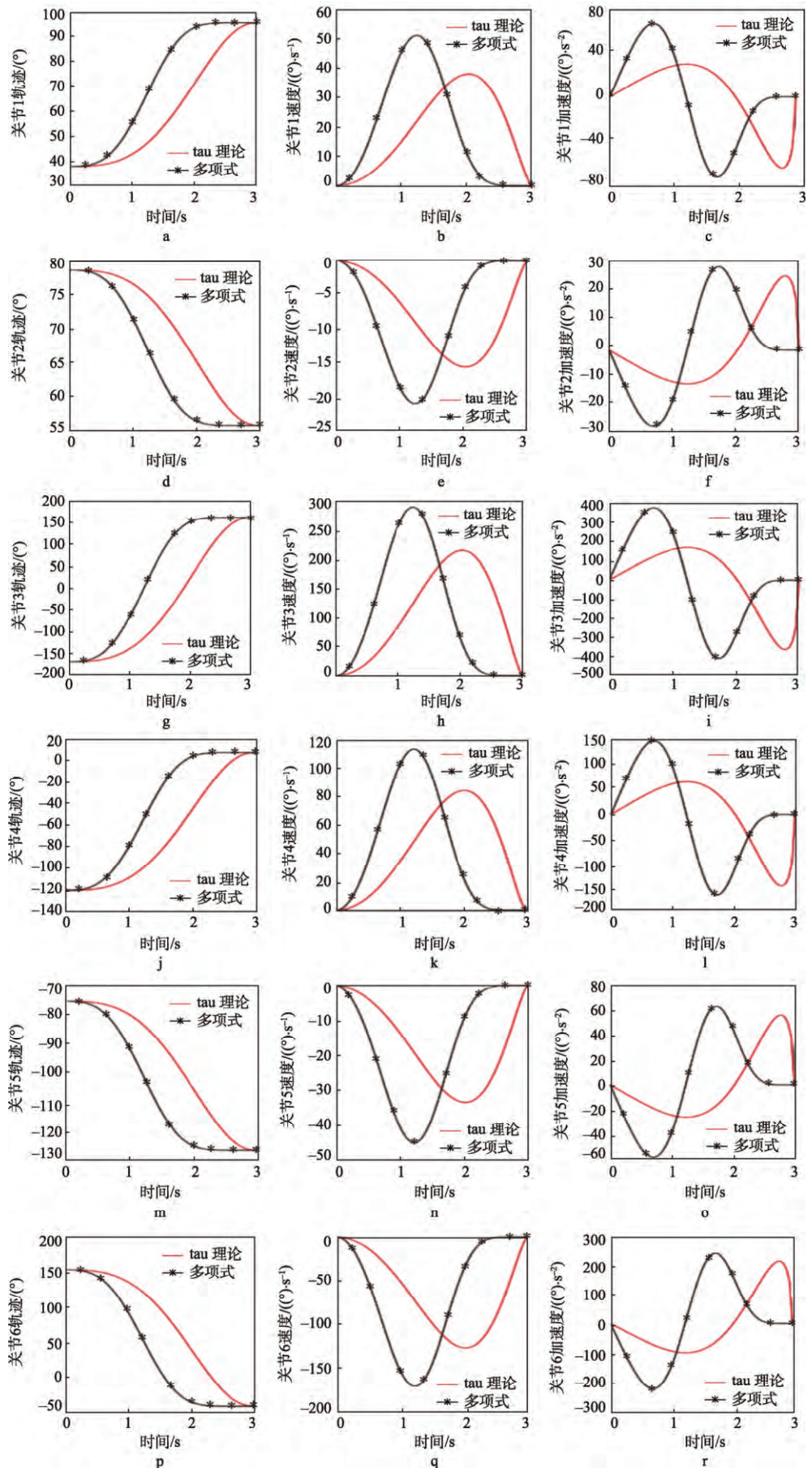


图 5 不同方法的轨迹曲线  
Fig.5 Trajectory curve of different methods

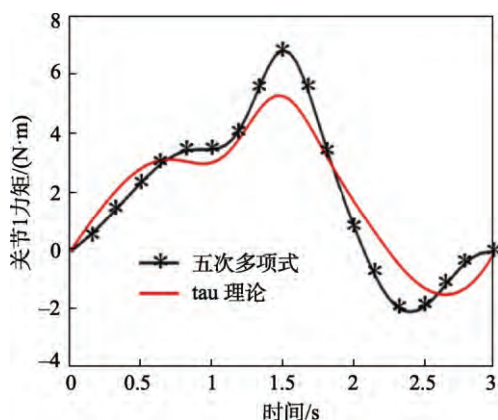


图6 不同方法的关节1力矩曲线

Fig.6 Joint 1 torque curves of different methods

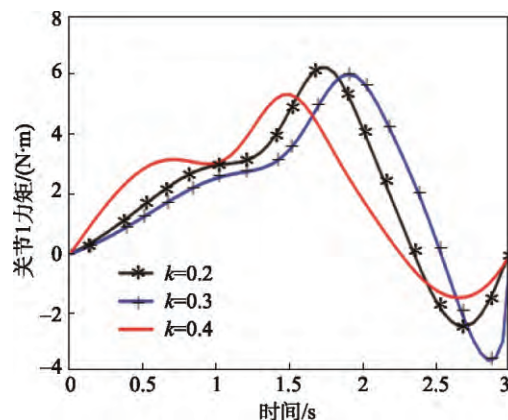
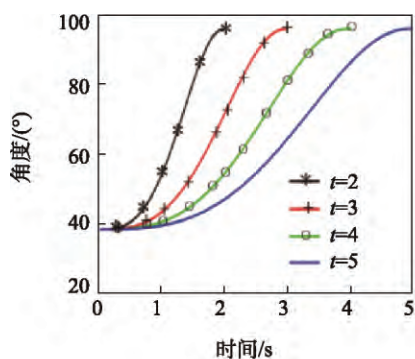
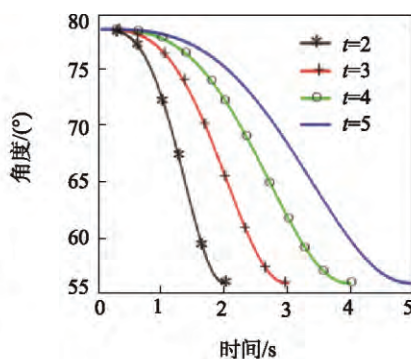


图7 关节1力矩曲线

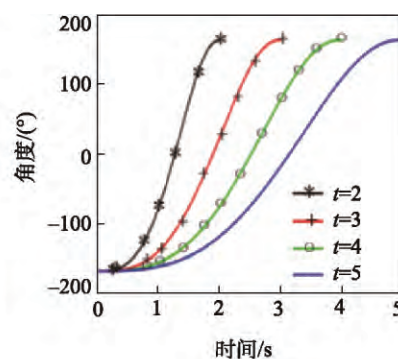
Fig.7 Joint 1 torque curve



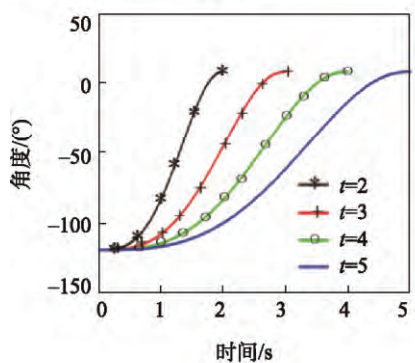
a 关节1



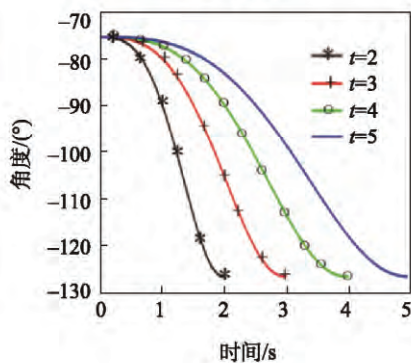
b 关节2



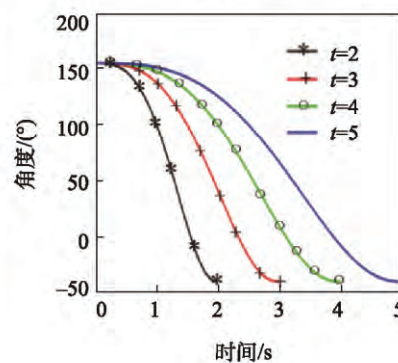
c 关节3



d 关节4



e 关节5



f 关节6

图8 不同运动时间的关节角度变化

Fig.8 Joint angle change at different time of motion

标点和时间参数导入到 Youbot 机器人控制系统中。最后,通过操控终端控制机器人按照预先设定的轨迹运动。

从图 11 实验结果曲线可得,未采用 Tau-jerk 策略得到的运动轨迹曲线以及速度曲线连续不平滑,而采用 Tau-jerk 策略得到的运动轨迹曲线以及速度曲线连续且光滑,与未采用 Tau-jerk 策略相比,其运动过程更加平稳,验证了该方法可以提高包装的效率。

### 3 方法的适应性推广应用

文中设计的基于 Tau-jerk 策略的机器人运动轨迹规划方法是机器人运动控制中的一种新技术成果,该方法得到的运动轨迹具备起点和终点的速度、加速度都为 0,生成的速度、加速度、力/力矩曲线光滑连续和控制柔顺的优点。同时,该 Tau-jerk 引导策略算法实现简单,方便在其他应用领域的机器人系统中实



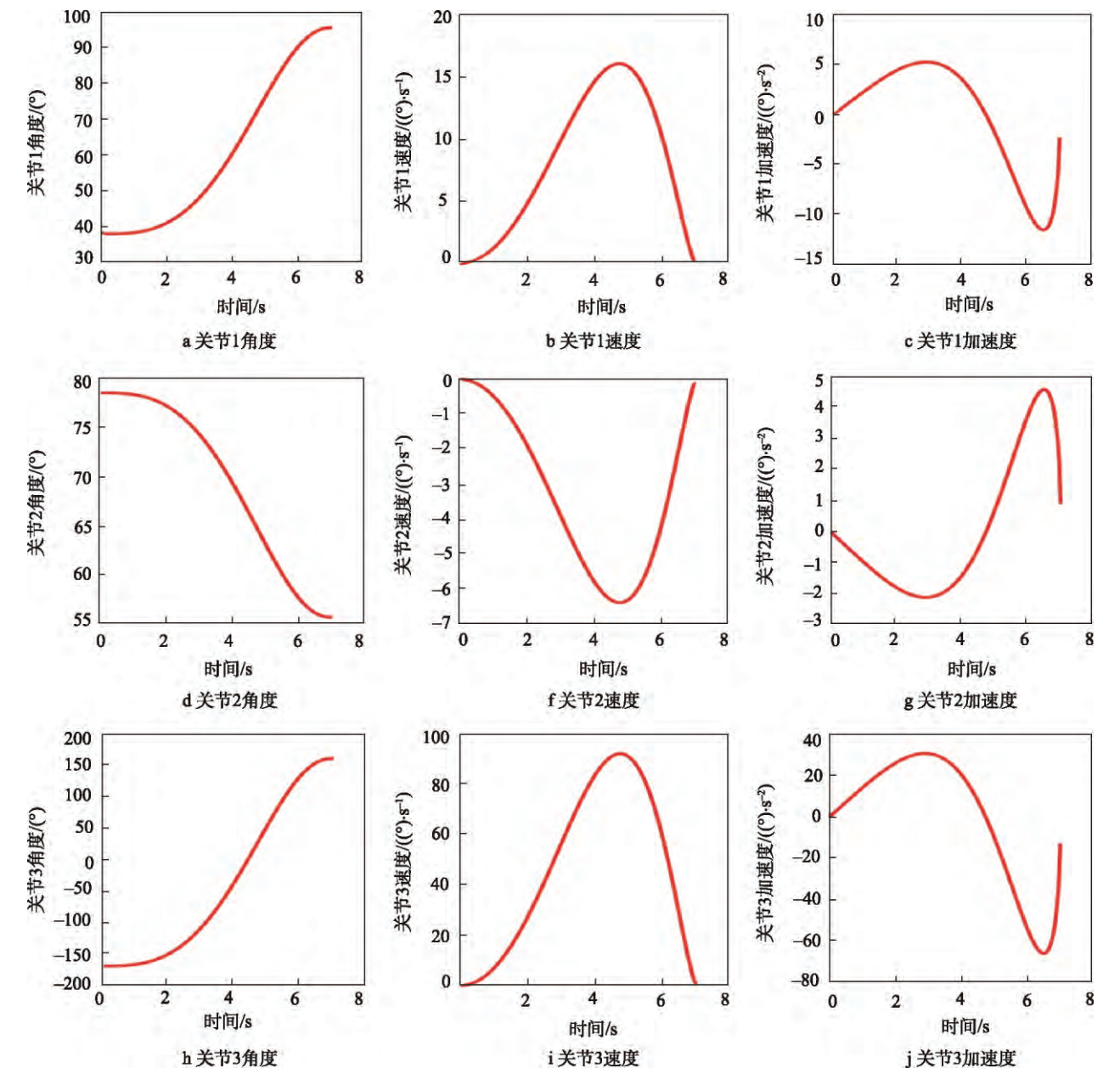


图 9 优化关节角度、速度、加速度曲线  
Fig.9 Curve of optimized joint angle, velocity and acceleration

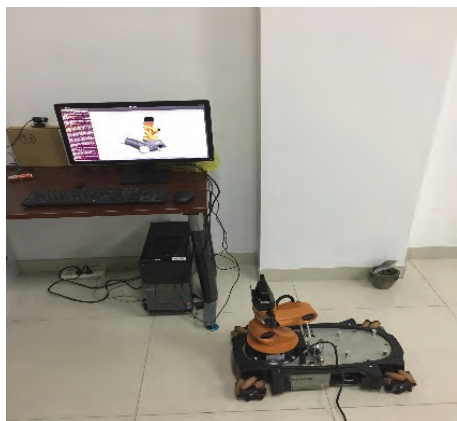


图 10 Youbot 机器人  
Fig.10 Youbot robot

现。该运动轨迹规划方法可以应用到国内很多的盐化工大包装生产企业的自动码垛机器人中，实现码垛过程中的无人化操作，保证机器人按照规划的路径平滑、快速运行，提高码垛速度和生产线的安全。也可以用于工件的搬运机器人中，避免了机器人搬运过程中频繁地快速启动、停止对机械结构的冲击，保证搬运过程中工件快速平稳运动到目标的位置。还可以用于包装堆垛多自由度机器人，使其在制定出的规划路径中平滑运行，避免机器人出现因速度和加速度突变引起的抖振，提高机器人的定位精度。此外，也可以推广应用于工件的轴孔装配、曲面磨削及去毛刺等，实现柔顺力控辅助装配。

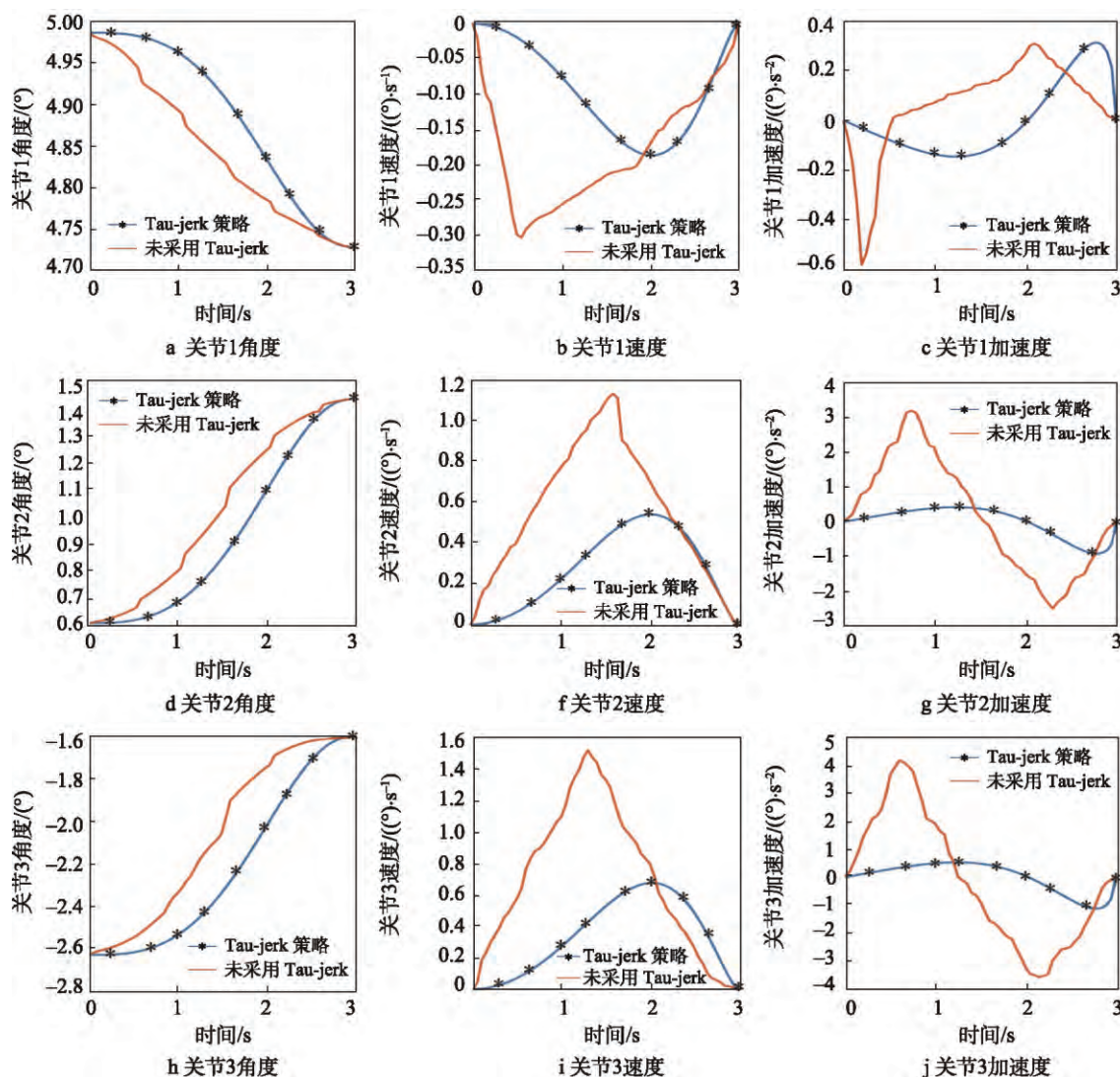


图 11 2 种方法角度、速度、加速度比较

Fig.11 Comparison of angle, velocity and acceleration of two methods

#### 4 结语

针对六自由度机器人设计基于 Tau-jerk 策略的轨迹规划方法。首先,对 Tau-jerk 策略进行理论分析。其次,根据 D-H 参数建立了六自由度机器人模型并对该模型进行了运动学和动力学分析。给定运动的初始位姿和目标位姿,当采用不同耦合因子时,仿真得到各关节不同的速度、加速度及力矩曲线,结果表明当耦合因子为 0.4 时,生成的速度、加速度和力矩曲线最为光滑连续。再次,对生成的轨迹,采用自适应遗传算法对其进行时间优化,优化结果表明,在保证速度、加速度约束的前提下,运动时间缩短了 41.18%,达到了优化效果。最后,搭建 KUKA Youbot 机器人实验平台,并在该平台上对该方法进行了实验验证,通过对比发现该方法规划出运动轨迹和速度曲线更加平滑连续,用时更少,验证了使用该方法可以提高包装的效率。

#### 参考文献:

- [1] 许文才,付亚波,李东立,等. 食品活性包装与智能标签的研究及应用进展[J]. 包装工程, 2015, 36(5): 1—10.  
XU Wen-cai, FU Ya-bo, LI Dong-li, et al. Progress in Research and Application of Food Packaging and Smart Labels[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(5): 1—10.
- [2] 张婷. 人机交互界面设计在产品可用性中的应用研究[J]. 包装工程, 2014, 35(20): 63—66.  
ZHANG Ting. Application Research of Human-machine Interaction Interface Design in Product Usability[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(20): 63—66.
- [3] 成贤锴,顾国刚,陈琦,等. 基于样条插值算法的工业机器人轨迹规划研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2014(11): 122—124.  
CHENG Xian-kai, GU Guo-gang, CHEN Qi, et al. In-

- dustrial Robot Trajectory Planning Based on Spline Interpolation Algorithm[J]. *Modular Machine Tool and Automatic Machining Technology*, 2014(11): 122—124.
- [4] MESSNER L, GATTRINGER H, BREMER H. Efficient Online Computation of Smooth Trajectories along Geometric Paths for Robotic Manipulators[M]. *Multibody System Dynamics, Robotics and Control* Vienna, Austria: Springer, 2013.
- [5] YU Z G, SHEN Y Q, SONG Z M. Robust Adaptive Motion Control for Manipulator[J]. *Control Theory & Applications* (S1751-8644), 2011, 28(7): 1021—1024.
- [6] CHEN K, KE W D, PENG Z P. An Improved Cooperative Method of Q Learning on Soccer Robot[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology: New Series*(S1005-9113), 2011, 18(1): 38—40.
- [7] DEBROUWERE F, LOOCK W, PIPELEERS G, et al. Time-optimal Path Following for Robots with Convex-concave Constraints Using Sequential Convex Programming[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2013, 29(6): 1485—1495.
- [8] BAUML B, WIMBOCK T, HIRZINGER G. Kinematically Optimal Catching a Flying Ball with a Hand-arm-system[C]// *Ieee/rsj International Conference on Intelligent Robots and Systems IEEE*, 2010: 2592—2599.
- [9] LIPPIELLO V, RUGGIERO F. 3D Monocular Robotic Ball Catching with an Iterative Trajectory Estimation Refinement[C]// *IEEE International Conference on Robotics and Automation IEEE*, 2012: 3950—3955.
- [10] SUN L, MA J, RUAN X G. Trajectory Planning and Simulation of 6-DOF Manipulator[J]. *Control Engineering of China* (S1671-7848), 2010, 17(3): 388—392.
- [11] LIU Z, HUANG P, YAN J, et al. Multi-objective Genetic Algorithms Fortrajectory Optimization of Space Manipulator[C]// *Industrial Electronics and Applications, 2009 ICIEA 2009 4th IEEE Conference on IEEE*, 2009: 2810—2815.
- [12] DAVID N L. A Theory of Visual Control of Braking Based on Information about Time-to-collision[J]. *Perception*, 1976, 5(4): 437—459.
- [13] 万传恒. 六自由度工业机器人轨迹规划算法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- WAN Chuan-heng. Trajectory Planning Algorithm for Six Degree of Freedom Industrial Robots[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [14] 张秀林. 基于遗传算法的机械臂时间最优轨迹规划[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
- ZHANG Xiu-lin. Time Optimal Trajectory Planning for Robotic Manipulators Based on Genetic Algorithm[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014.
- [15] SUN N L, WANG Y J. Time-optimal Trajectory Planning Based on Improved Adaptive Genetic Algorithm[J]. *Journal of Measurement Science and Instrumentation*, 2012, 3(12): 103—108.