[自控・检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.01.011

基于位姿调整的晶圆传输机器人轨迹规划

蔡昌宗,宋 芳

(上海工程技术大学工程实训中心,上海 201620)

摘 要:为了提高晶圆传输机器人的运行效率和运动平稳性,课题组基于末端执行器的位姿调整对晶圆传输机器人进行 了轨迹规划研究。首先,介绍了晶圆传输实验平台的机构组成,在此基础上采用了动静法对晶圆受力进行分析,得出加 速度与位姿角度之间的内在关系;其次,提出了一种基于位姿调整的S曲线加减速控制算法,并基于该算法实现了对末 端执行器的轨迹规划;最后,采用 MATLAB 软件编程,实现了关键参数的求解和算法仿真,得到了加速度、速度、位移随 时间变化的曲线图。应用结果表明此轨迹规划可以在保证高度运动平稳的情况下提高晶圆传输机器人的工作效率。 关键 词:晶圆传输机器人;末端执行器:轨迹规划;S曲线;算法仿真

中图分类号:TP242.3 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2019)01-0061-04

Trajectory Planning of Wafer Transfer Robot Based on Pose Adjustment

CAI Changzong, SONG Fang

(Engineering Practice and Training Center, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to improve the operating efficiency and smoothness of the wafer transfer robot, the trajectory planning of the wafer transfer robot was studied based on the pose adjustment of the end effector. Firstly, the mechanism composition of the wafer transfer experimental platform was introduced. Based on this, The force of the wafer was analyzed by using dynamic static method. Then the internal relationship between acceleration and pose angle was obtained. Secondly, a S-curve acceleration and deceleration control algorithm based on pose adjustment was proposed. Based on the algorithm, the trajectory planning of the end effector was realized. Finally, MATLAB programming was used to solve the key parameters and simulate the algorithm. Meanwhile, time history plots of acceleration, velocity and displacement were obtained. The application results show that this trajectory planning can improve the working efficiency of the wafer transfer robot under the condition of ensuring high motion stability.

Keywords: wafer transfer robot; end effector; trajectory planning; S-curve; algorithm simulation

晶圆传输机器人是半导体集成电路制造业中重要 的传输设备,其平稳性、定位精度及其工作速度等直接 影响着晶圆的制造质量和生产效率,而轨迹规划是晶 圆传输机器人运动控制的基础^[14]。机器人轨迹一般 是指工业机器人在工作过程中的运动轨迹,即末端执 行器的位移、速度和加速度。而机器人的轨迹规划是 指根据末端操作器的初始位姿和目标位姿,在工作过 程中对每个关节的路径、速度和加速度进行人为的设 定^[5-7]。晶圆传输机器人属于工业机器人的范畴,对晶 圆传输机器人进行轨迹规主要是对末端末端执行器在 工作中的位姿变化、速度和加速度进行人为设定。晶 圆传输机器人在运行中不能有冲击,否则会影响晶圆 的生产质量^[8]。由于S曲线算法可保证加速度和速 度曲线的连续性,在运行中没有冲击,因此可基于S曲 线对传输机器人进行轨迹规划^[9-10]。

课题组针对如何有效提高晶圆传输效率的问题, 对晶圆传输实验平台的轨迹规划进行了研究,结合位 姿调整和S曲线算法对末端执行器进行了轨迹规划。

收稿日期:2018-07-12;修回日期:2018-10-20

基金项目:国家青年科学基金项目"基于微结构阵列的高摩擦低粘附晶圆高效传输机理与主动控制方法的研究"(51505273)。 第一作者简介:蔡昌宗(1995),男,河南信阳人,硕士研究生,主要研究方向为机器人运动控制。E-mail:964781908@ qq. com

1 晶圆传输实验平台

1.1 晶圆传输实验平台机构组成

晶圆传输机器人的主体是晶圆传输实验平台,实 验平台是具有二自由度运动系统的机构。二自由度运 动包括直线运动和旋转运动。因此,要实现晶圆片的 快速、平稳运输,就需要对高加速直线运动和旋转运动 进行同步控制。晶圆传输实验平台模型如图1所示。 平台的底部是直线电机,通过其直线运动保证晶圆传 输过程的平稳。电机支架上的旋转电机调整末端执行 器的位姿角度,以提高运行效率。

直线电机 晶圆 末端执行器 旋转电机 电机支架 底座



图1 晶圆传输实验平台模型

Figure 1 Experimental platform model for wafer transfer1.2 晶圆受力分析

在传输实验平台的直线运动中,加速度、速度曲线 是对称的,晶圆在各运动阶段中的力学状态是相似的, 主要区别在于受力方向。因此可对初始加速阶段进行 力学分析,其他阶段进行类比分析。通过分析晶圆传 输实验平台的直线加速度特性与末端执行器的位姿转 角关系,可推导出末端执行器位姿角度 θ 与时间 t 的 分段函数方程:

$$\theta = \begin{cases} 0, 0 \le t < T_0; \\ \omega(t - T_0), T_0 \le t \le T_{10} \end{cases}$$
(1)

式中: T_0 为末端执行器水平位姿下晶圆达到最大加速 度所用的时间; T_1 为末端执行器在位姿角度调整下晶 圆达到最大加速度所用的时间; ω 为末端执行器的角 速度。

在位姿调整时,旋转电机连续沿逆时针方向转动, 旋转角度开始增大,加速度不断增加。为增大摩擦力, 末端执行器采用了微结构阵列的设计。在微结构上的 晶圆受力状态如图2所示。利用达朗贝尔原理^[11],可 以求解在位姿调整下直线电机所需要达到的加速度

 $a = g(\sin \theta + \mu \cos \theta) / (\cos \theta - \mu \sin \theta) .$ (2) 式中:g 为重力加速度; μ 为等效摩擦因数。

2 基于位姿调整的轨迹规划

2.1 S曲线加减速控制算法分析

在晶圆传输实验平台中,轨迹规划主要分为2个 方面:直线电机的直线运动规划和末端执行器的位姿



图2 晶圆受力分析

Figure 2 Force analysis of wafer

调整。直线运动规划的要求是高速、平稳,因此在直线 的运动中不能有冲击。在直线运动中,有几种常用的 加减速控制算法:梯形曲线、指数曲线和S曲线。由于 S曲线平稳性好,因此课题组基于S曲线加减速控制 算法进行轨迹规划。

S曲线加减速控制算法的特点是将加减速分为7 个阶段:加加速阶段、匀加速阶段、加减速阶段、匀速阶 段、减加速阶段、匀减速阶段和减减速阶段。其中加 加速度和减减速度均为常量。由于加速度是连续变化 的,因此传输平台按S曲线算法运动时,速度曲线是连 续光滑的,从而保证了传输晶圆的过程的平稳性。在 基于S曲线算法运动时,对加速度和速度有一定的要 求,即不能超过传输实验平台的最大加速度和最大运 行速度。

2.2 基于 S 曲线加减速控制算法的轨迹规划

在直线电机的直线运动中,末端执行器需要同时 旋转,做位姿调整,以使晶圆不发生滑移。为了配合末 端执行器的位姿调整,同时保证运行的平稳性,提出了 一种基于位姿调整的S曲线加减速控制算法,其速度、 加速度和位移随时间变化规律如图3所示。

图 3 中 $t_0 \sim t_{10}$ 为各个阶段的过度时间点, a_{max} 为最 大加速度, v_{max} 为最大运行速度。与传统的 S 曲线算法 不同,基于位姿调整的 S 曲线算法多了位姿调整的阶 段。加加速阶段:在 0 ~ t_0 的时间段内,加速度是匀加 的,但在 $t_0 \sim t_1$ 时间段内,加速度是根据位姿角度而变 加的。

根据位姿调整的S曲线算法,可对末端执行器做 出轨迹规划:

 在加加速阶段,当加速度没有达到水平位姿下的最大加速度时,加速度按常量J增加。当加速度达 到水平位姿下的最大加速度后,旋转电机开始沿逆时 针方向转动,末端执行器开始位姿调整,加速度为末端





model based on pose adjustment

执行器位姿调整下的对应加速度。因此加速度的函数 方程与位姿角度方程分别为:

$$a = \begin{cases} Jt, 0 \leq t < t_0; \\ g \frac{\sin \omega (t - t_0) + \mu \cos \omega (t - t_0)}{\cos \omega (t - t_0) - \mu \sin \omega (t - t_0)}, t_0 \leq t < t_1 \\ \theta = \begin{cases} 0, 0 \leq t < t_0; \\ \omega (t - t_0), t_0 \leq t < t_1 \\ 0 \end{cases}$$

2) 在匀加速阶段,末端执行器的位姿不再变化, 位姿角度固定,加速度方程与位姿角度方程分别为:

$$a = g \frac{\sin \omega(t_1 - t_0) + \mu \cos \omega(t_1 - t_0)}{\cos \omega(t_1 - t_0) - \mu \sin \omega(t_1 - t_0)}, t_1 \le t < t_2;$$

$$\theta = \omega(t_1 - t_0), t_1 \le t < t_2 \circ$$

3)在加减速阶段,加速度开始减小。旋转电机开始沿顺时针方向转动,末端执行器同时进行位姿调整,加速度为末端执行器位姿调整下的对应加速度。当末端执行器位姿调整结束后,此时为水平位姿,加速度按常量减小。加速度函数方程与位姿角度方程分别为:

$$a = \begin{cases} g \frac{\sin \left[\omega(t_1 - t_0) - \omega(t - t_2) \right] + \mu \cos \left[\omega(t_1 - t_0) - \omega(t - t_2) \right]}{\cos \left[\omega(t_1 - t_0) - \omega(t - t_2) \right] - \mu \sin \left[\omega(t_1 - t_0) - \omega(t - t_2) \right]}, t_2 \leq t < t_3; \\ -Jt + \mu g, t_3 \leq t < t_{4\circ} \\ \theta = \begin{cases} \omega \left[(t_1 - t_0) - (t - t_2) \right], t_2 \leq t < t_3; \\ 0, t_3 \leq t < t_{4\circ} \end{cases} \end{cases}$$

4) 在匀速阶段,末端执行器处于水平位姿下,加 速度为0,即:

$$a = 0, t_4 \le t < t_5;$$

 $\theta = 0, t_4 \le t < t_{50}$

5) 在减加速阶段,当反向加速度没有达到水平位 姿下的反向最大加速度时,反向加速度按常量 J 增加。 当反向加速度达到水平位姿下的反向最大加速度后, 旋转电机开始沿顺时针方向转动,末端执行器开始位 姿调整,反向加速度为末端执行器位姿调整下的对应 反向加速度。加速度的函数方程与位姿角度方程分 别为:

$$a = \begin{cases} -J(t - t_{5}), t_{5} \leq t < t_{6}; \\ -g \frac{\sin \omega(t - t_{6}) + \mu \cos \omega(t - t_{6})}{\cos \omega(t - t_{6}) - \mu \sin \omega(t - t_{6})}, t_{6} \leq t < t_{7}; \\ \theta = \begin{cases} 0, t_{5} \leq t < t_{6}; \\ -\omega(t - t_{6}), t_{6} \leq t < t_{7}; \end{cases}$$

6) 在匀减速阶段,末端执行器的位姿不再变化, 位姿角度固定,加速度函数方程与位姿角度方程为:

$$a = -g \frac{\sin \omega (t_7 - t_6) + \mu \cos \omega (t_7 - t_6)}{\cos \omega (t_7 - t_6) - \mu \sin \omega (t_7 - t_6)}, t_7 \leq t < t_8;$$

$$\theta = -\omega (t_7 - t_6), t_7 \leq t < t_8 \circ$$

7)在减减速阶段,反向加速度开始减小。旋转电机开始沿逆时针方向转动,末端执行器同时进行位姿调整,反向加速度为末端执行器位姿调整下的对应反向加速度。当末端执行器位姿调整结束后为水平位姿,反向加速度按常量减小。加速度方程与位姿角度方程分别为:

$$a = \begin{cases} -g \frac{\sin \left[\omega(t_7 - t_6) - \omega(t - t_8)\right] + \mu \cos \left[\omega(t_7 - t_6) - \omega(t - t_8)\right]}{\cos \left[\omega(t_7 - t_6) - \omega(t - t_8)\right] - \mu \sin \left[\omega(t_7 - t_6) - \omega(t - t_8)\right]}, t_8 \leq t < t_9; \\ Jt - \mu g, t_9 \leq t < t_{10^\circ} \\ \theta = \begin{cases} -\omega \left[(t_7 - t_6) - (t - t_8)\right], t_8 \leq t < t_9; \\ 0, t_9 \leq t < t_{10^\circ} \end{cases} \end{cases}$$

在加减速的7个阶段中,对末端执行器的位姿变 化和直线电机的加速度进行分析,根据各阶段的加速 度方程和末端执行器的位姿变化方程,对参数进行设 定,即可以确定末端执行器的运动轨迹。

2.3 关键参数求解

由于晶圆传输过程中的加速度与旋转电机的转速 是相关的。考虑到旋转过程中离心力的作用,将转速 定为120 r/min,即ω为12.56 rad/s。在转速为120 r/ min 的条件下,可以根据加速度公式对末端执行器的 轨迹进行规划。

在轨迹规划的过程中,还需要求解 2 个关键参数: 最大加速度和匀加速过程用时,可根据已知的参数进 行求解。已知的参数设定为:加加速度 J = 40~000mm/s³,最大速度 $v_{max} = 900$ mm/s,旋转电机旋转角速 度 $\omega = 12.56$ rad/s,行程 S = 500 mm,等效摩擦因数 μ

$$=0.447_{\circ} 根据已知参数可以列出参数间的函数方程:$$

$$2\int_{0}^{t_{1}-t_{0}}g\frac{\sin \omega t + \mu\cos \omega t}{\cos \omega t - \mu\sin \omega t}dt +$$

$$g\frac{\sin \omega(t_{1}-t_{0}) + \mu\cos \omega(t_{1}-t_{0})}{\cos \omega(t_{1}-t_{0}) - \mu\sin \omega(t_{1}-t_{0})}(t_{2}-t_{1}) + \mu gt_{0} =$$

利用 MATLAB 得到最终的结果为:匀加速过程用

时 $(t_2 - t_1) = 0$ s;最大加速度 $a_{\text{max}} = 10\ 200 \text{ mm/s}^2$ 。

3 基于 MATLAB 的轨迹仿真分析

利用上节中的计算结果和加速度函数方程,在 MATLAB 中编程,得到仿真结果,如表1所示,得到直 线运动部分的加速度、速度、位移曲线如图4所示。

表1	仿真分析结果对比	

TT 1 1 1	c ·	C	· 1.·	1 .	1.
Table 1	Comparison	ot	simulation	analysis	results

	加加速度/ (mm・s ⁻³)	最大速度/ (mm・s ⁻¹)	旋转电机旋转角 速度/(rad · s ⁻¹)	行程/mm	最大加速度/ (mm・s ⁻²)	等效摩擦因数	总用时/ms
水平位姿	40 000	900	0.00	500	4 380	0.447	871
位姿调整	40 000	900	12.56	500	10 200	0.447	829





Figure 4 Curve contrast diagram of acceleration, velocity and displacement

由图4可以看出速度曲线连续光滑,位移曲线没 有突变,因此在整个晶圆传输过程中,平稳性良好。由 表1可知,通过位姿调整,传输最大加速度增大,总行 程用时缩短42 ms,传输效率提高,证明通过位姿调整 来提高传输效率的方法是可行的。

4 结语

课题组基于S曲线规划了晶圆传输实验平台的运动轨迹。在晶圆的受力分析基础上,运用达朗贝尔原 理求解出了位姿调整下加速度与位姿角度的关系式, 并根据此关系式提出一种基于位姿调整的S曲线加减 速控制算法。根据该算法对末端执行器进行了轨迹规 划,利用 MATLAB 进行仿真,得到位姿调整与水平位 姿下的加速度、速度和位移曲线。仿真结果表明,采用 了位姿调整的晶圆传输实验平台的传输效率得到了有 效的提高。

参考文献:

- [1] 张昊,孙强,李龙晶,等. 基于 ADAMS 的硅片传输机器人轨迹规 划及仿真[J].组合机床与自动化加工技术,2013(2):70-73.
- [2] 张志松.基于双S形速度曲线的混联码垛机器人轨迹规划[J].机 电工程,2018,35(3):330-334.
- [3] ZUBEREK W M. Cluster tools with chamber revisiting-modeling and analysis using timed petri nets [J]. IEEE Transactions on semiconductor manufacturing, 2004, 17(3):333 – 334.
- [4] CHOI Y K, PARK J H, Kim H S, et al. Optimal trajectory planning and sliding mode control for robots using evolution strategy [J]. Robotica, 2000, 18(4):423-428.
- [5] 韩建海.工业机器人[M].3版.武汉:华中科技大学出版社, 2015:171-173.
- [6] 高岩.工业机器人轨迹规划算法的研究与实现[D].沈阳:中国科 学院研究生院(沈阳计算技术研究所),2014:3-6.
- [7] 孙瑛,程文韬,李公法,等.关节型机器人轨迹规划算法及轨迹规划研究现状[J].长江大学学报(自然科学版),2016,13(28):32-38.
- [8] 刘小磊. R-Theta 型硅片传输机器人轨迹规划研究与实现[D]. 哈 尔滨:哈尔滨工业大学,2016:7-9.
- [9] 杨超,张冬泉.基于S曲线的步进电机加减速的控制[J].机电工程,2011,28(7):813-817.
- [10] 胡永安,陈彩凤,杨萌.基于 Matlab 的 S 曲线加减速控制算法研究[J].电子科技,2017,30(4):60-62.
- [11] 范钦珊,陈建平.理论力学[M].2版.北京:高等教育出版社, 2010:296-298.

 $v_{
m max \ o}$