

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.05.011

# 气囊抛光工件的几何信息重构研究\*

阮 航

(浙江工业大学 特种设备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 浙江 杭州 310014)

**摘要:**针对传统的气囊抛光操作都需要工件 CAD 信息所引起的建模效率低下、操作复杂等问题,将一种能够在线自动重构工件几何信息的技术应用到机械臂气囊抛光系统中。详细介绍了抛光工件未知曲面在线重构的操作方法和基础理论原理,从而获取未知气囊抛光工件曲面的法矢量和切矢量,提出了一种基于位置内环补偿的力外环主动柔顺控制方案,利用抛光机械臂末端的位置补偿来实现气囊抛光所引起的接触力控制,并建立了气囊抛光接触力控制模型;另外,还搭建了一个能够对未知工件进行建模的实验平台,对理论原理进行了模拟性实验。研究结果表明,该策略应用于跟踪和识别一个未知的抛光工件曲面是可行、有效的。

**关键词:**气囊抛光;在线重构;主动柔顺控制;位置补偿

中图分类号:TH692.9;TP181;TP11

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)05-0591-05

## Reconstruction of geometry information to gasbag polishing workpiece

RUAN Hang

(Key Laboratory of Special Equipment and Advanced Manufacturing Technology, Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of reconstruct an unknown workpiece operations are always required by CAD information of workpiece which cause efficiency low, operation complex and so on, the one which design and implementation of gasbag polishing operations which can automatically online reconstruct the geometry information of workpiece was investigated. The operation method of online reconstruction of a workpiece surface and the basic theory were introduced, in order to obtain the normal vector of workpiece surface. The outer ring of active compliance control based on the inner position loop was proposed, the position compensation at the end of the polishing manipulator was used to achieve the gasbag polishing contact force control. The contact force model of gasbag polishing was established. The trajectory planning algorithm with time-varying constraints was established. An experimental platform which is capable to reconstruct an unknown workpiece was built, the theory was simulated. The results indicate that this strategy is feasible and effective.

**Key words:** gasbag polishing tool; online reconstruction; active compliance control; position compensation

## 0 引 言

目前,如果要对一个未知几何模型的工件进行气囊抛光,那么首先必须借助于一些辅助设计、制造软件,例如 CAD、CAM、CAPP 等,以构建工件的三维模型,生成预期的气囊抛光加工轨迹,规划抛光加工过程的一些工艺参数。并且这个过程必须依靠人为参与进行,因为这些辅助设计、制造、工艺规划软件相互之间接口的兼容性不是很好。这就对气囊抛光操作者提出

了一定的专业技能要求:会进行抛光工件的三维实体建模,并懂得一些气囊抛光加工的工艺知识。

未知环境下机器人辅助气囊抛光系统<sup>[1]</sup>不需要借助这些计算机辅助设计、制造软件,基于自身系统就能识别并获取抛光工件的几何特征模型,并生成相应的气囊抛光加工工艺参数及抛光加工轨迹,整个过程不需要人工参与。这种方式是未来机器人辅助气囊抛光加工,甚至是整机械加工工业的生产模式。它是实现气囊抛光自动化、柔性化的基础,尽可能地减少了人

收稿日期:2013-12-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50575285)

作者简介:阮 航(1980-),男,浙江宁波人,主要从事机电控制系统技术及其理论方面的研究. E-mail:824726465@qq.com

工的干预和管理,提高了气囊抛光加工的效率,降低了加工成本,同时也使抛光加工变得更加灵活。随着知识和信息密集型的制造工业迅速发展,实现集成 CAD、CAM 的智能气囊抛光系统已成为必然要求。这是工业自动化的发展方向,也将成为高科技研究领域的重要课题。这不仅在理论上具有重要意义,而且在技术上对于机器人辅助气囊抛光加工的自动化、智能化生产有着重要价值。

本研究主要探讨气囊抛光工件的几何信息重构。

## 1 问题描述

在给出可能的解决方案之前,需要先给出抛光工件曲面的正式数学函数描述。任意非负的、非一致曲率的工件曲面  $M \subset R^3$ , 可以记作:

$$z = g(x, y) \quad (1)$$

或记作参数形式式:

$$r = r(\zeta, \xi), x = x(\zeta, \xi), y = y(\zeta, \xi), z = z(\zeta, \xi) \quad (2)$$

其中,  $(\zeta, \xi)$  在  $R^2$  平面的某个区域内变化。对于抛光来说,工件曲面的这些几何参数信息都是未知的。

为了简化问题,曲面  $M$  有时可以考虑成更简单的、更容易想象的平面曲线,即函数形式  $z = g(x)$  和参数形式  $x = x(l), y = y(l)$ , 与曲面类似,  $l$  是曲线的参数,一般取自然参数,即速度向量为单位向量的参数。

虽然工件的 CAD 信息未知,但对于抛光操作来说,不需要知道抛光工件曲面的所有几何信息<sup>[2]</sup>, 只需要知道抛光点外法向量  $\mathbf{n}$ , 即在线辨识工件未知曲面法矢量。因为在抛光操作过程中,气囊与工件抛光点处是垂直的,也就是说机械臂末端的法矢量与抛光点处的外法向量重合,求得工件抛光点处的外法向量  $\mathbf{n}$ , 即相当于求得机械臂末端的位姿<sup>[3]</sup>。

## 2 详细方案

### 2.1 理论依据

基于方程式(2)的曲面描述形式,本研究将待加工曲面离散为某个间距的网格,坐标  $(x_i, y_i)$  的顶点记作  $z_{i,j} (i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n)$ , 借助于预定的接触力跟踪控制策略,使机械臂与曲面的网格顶点  $(x_i, y_i, z_k)$  接触并保持预定接触力,然后调节工具姿态,调节过程中机械臂仅有腕关节的运动,来确定该点附近的某点使气囊压力达到最大的坐标  $(x_i + \Delta x_i, y_j + \Delta y_j, z_k + \Delta z_k)$ 。此时,可以粗略地认为抛光工具的轴向与该点的外法向量  $\mathbf{n}_{i,j,k} (x_i, y_j, z_k)$  一致,也就是通过反复迭代,并借助于概率推理和 Markov 原理,不断地更新该点的外法向量。

这个方案的理论依据是:工件曲面  $M \subset R^3$  外一点  $p$  到该曲面的最近点  $s \in M$  之间的有向线段  $\vec{sp}$ , 它的方向矢量也就是曲面  $M$  在点  $s$  的外法向量  $\mathbf{n}_s$ 。对于这个结论,当曲面  $M$  是一个球面,直接就可以看出<sup>[4]</sup>。

对于任意的凸曲面  $M$ , 这个结论的简要证明如下:

假设曲面  $M \subset R^3$  的某个片段  $N \subset M$  有参数形式:  $\mathbf{r} = \mathbf{r}(\zeta, \xi)$  和  $\mathbf{r} = \mathbf{r}(x, y, z)$ , 其中:  $(\zeta, \xi)$  为该曲面片段的坐标,以坐标  $(\zeta, \xi)$  给出的曲线  $\zeta(t)$  和  $\xi(t)$  嵌入在曲面片段  $N$  上曲线  $\mathbf{r}(t) = \mathbf{r}(\zeta(t), \xi(t))$ 。那么它的速度向量为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{r}}(t) = r_\zeta \dot{\zeta} + r_\xi \dot{\xi} \\ r_\zeta \stackrel{\Delta}{=} \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \zeta} = \left( \frac{\partial x}{\partial \zeta} \frac{\partial y}{\partial \zeta} \frac{\partial z}{\partial \zeta} \right) \\ r_\xi \stackrel{\Delta}{=} \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \xi} = \left( \frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial z}{\partial \xi} \right) \end{cases} \quad (3)$$

如果所考察的点不是曲面的非奇异点,则向量  $\mathbf{r}_\zeta$  和  $\mathbf{r}_\xi$  是线性无关的。工件参数方程表达式  $\mathbf{r} = \mathbf{r}(\zeta, \xi)$  曲面上的点  $p(\zeta_0, \xi_0)$  是一个非奇异的坐标点,那么则点  $p = (x_0, y_0, z_0) = (x(\zeta_0, \xi_0), y(\zeta_0, \xi_0), z(\zeta_0, \xi_0))$  对应的矩阵  $\mathbf{p} = \begin{bmatrix} \partial x / \partial \zeta & \partial y / \partial \zeta & \partial z / \partial \zeta \\ \partial x / \partial \xi & \partial y / \partial \xi & \partial z / \partial \xi \end{bmatrix}$  的秩为 2。

由式(3)可得:曲面片段  $N$  的任意切向量都是向量  $\mathbf{r}_\zeta$  和  $\mathbf{r}_\xi$  的线性组合。所以,该非奇异点处与曲面片段  $N$  相切的所有向量组成一个以  $\mathbf{r}_\zeta$  和  $\mathbf{r}_\xi$  为基底的二维空间,称之为该点处  $N$  的切平面。如果曲面片段  $N$  外一点  $p$  垂直并通过该曲面上某点  $s \in M$ , 即点  $s$  是  $p$  到曲面片段  $N$  的最近点。因为曲面片段  $N \subset M$  的定义是任意的,点  $s$  也是  $p$  到曲面  $M$  的最近点。如果把机械臂腕关节中心看作是待加工曲面外一点  $p$ , 当保持腕关节中心坐标不变时,假设气囊始终与曲面片段  $N$  保持接触,改变抛光工具的姿态,当腕关节中心与气囊接触点达到最小值时,那么从接触到腕关节中心的方向正好是该曲面片段的外法向量<sup>[5]</sup>, 此时,气囊压力达到最大值。这正是该方案的关键所在,该方案操作示意图如图 1 所示。其实,该测量系统的原理就是不断地微调抛光工具的姿态,每次都计算一次腕关节中心到抛光接触点的距离,拿该值与前一次测量值比较,保存较小值。这样不断循环若干次数后,保存的那个最小值基本就是抛光点处的外法向量所在的方向。

### 2.2 操作步骤

尽管无法直接测量外法向量,本研究根据上述的理论依据,当中心保持不变时,假设关闭力跟踪控制环,仅改变腕关节变量,并调节抛光工具姿态。在这个

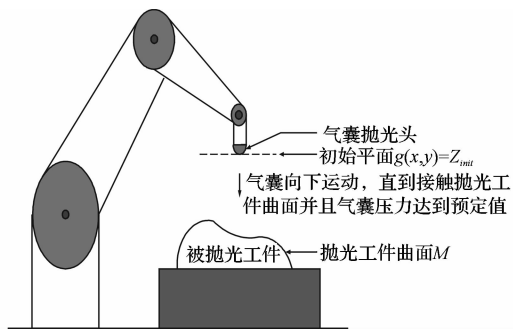


图1 方案操作示意图

过程中腕关节中心到接触点距离将发生变化,这一距离变化将导致气囊压力变化。而且,从接触到腕关节中心的有向线段方向正好是曲面片段的外法向量时,气囊压力达到最大值。这也就是说,待加工曲面上某个接触点的外法向量  $\mathbf{n}$  与机械臂的关节变量  $\theta$ 、气囊压力  $f$  有关<sup>[6]</sup>,由于气囊接触变形是未知,它们之间没有明确的线性或非线形关系,无法建立观测器来确定  $\mathbf{n}$ 。但可以通过概率推理方法,递推地确定某接触点对应的外法向量为  $\mathbf{n}$  的概率  $p(\mathbf{n})$ 。在抛光操作的  $t$  时刻,某点外法向量的概率估计为条件概率  $p(\mathbf{n} | \theta_t, f_t)$ 。现有很多文献为这一工作提供诸多可用的算法。此外,通过神经网络可以很好地把高维数据信息  $\theta_t, f_t$  映射到低维空间,也可以考虑采用神经网络方法找到未知曲面上某点的外法向量。

根据 Markov 原理,以及过去的信息,当已知曲面上某点的外法向量时,未来的测量信息  $\theta_t, f_t$  与过去的测量无关。由此可以形成下述的迭代过程。

事实上,著名的 Kalman 滤波器也是一个递归过程,也是基于概率推理的思想,尽管现在多数 Kalman 滤波器文献中看不到概率推理的影子,而 Kalman 在 1960 年发表的原始文章中的确是采用概率推理原理导出他的滤波器。目前,概率推理也是 AI 领域的主要工具。

具体操作如下:

Step 1: 根据输入的待加工区域参数  $l_x$  和  $l_y$ , 并假设待抛光工件曲面  $M$  初始为平面  $g(x, y) = z_{init}$ , 其中  $z_{init}$  是某个估计常数。选择某个间距  $\varepsilon$  将这个初始平面离散成  $m \times n$  网格,  $m = l_x / \varepsilon$  和  $n = l_y / \varepsilon$ 。并且指定所有抛光坐标点  $(x_i, y_j, z_{init})$  的初始外法向量为  $\mathbf{n}_{i,j,init} = (0, 0, 1)$ , 且初始概率  $P(\mathbf{n}_{i,j,init}) = 1$ 。

Step 2: 对于  $i = 1:m, j = 1:n$  对应的每一个坐标  $(x_i, y_j, z_{init})$ , 用接触力跟踪控制, 使机械臂直接运动至  $(x_i, y_j, z_{init})$  位置, 补偿  $z_{i,j} = z_{init} + \Delta z$ , 使接触力跟踪上预定值  $f_{i,j}$ 。一旦接触力稳定, 就关闭力跟踪控制环, 然后位置控制环使腕关节变量连续微变, 并启动外法

向量推算算法, 确定每一个表面上的坐标点  $(x_i + \Delta x_i, y_j + \Delta y_j, z_{i,j} + \Delta z_{i,j})$  的外法向量  $\mathbf{n}_{i,j}$ 。并记录每个接触点的抛光时间  $t_{i,j}$ 。

Step 3: 根据 Step 2 确定的曲面外法向量  $\mathbf{n}_{i,j}$ , 以及机械臂的当前位姿, 相邻的外法向量之间的夹角反映曲率的变化, 按照曲率变化最小, 规划一条最优的抛光轨迹, 并执行抛光操作, 记录每个坐标点的抛光时间。当某些坐标点的去除量  $\int_0^{t_{i,j}} f_{i,j}(\tau) d\tau \geq \bar{\omega}$  时, 将这些点加上平均接触面标记为障碍点, 后续的抛光轨迹将避开这些障碍点。

Step 4: 如果待加工区域全部标记为障碍, 则抛光操作完毕; 否则, 返回 Step 3。

### 3 抛光柔顺力控制

气囊抛光机器人系统的主动柔顺控制策略<sup>[7]</sup>与机器人阻抗力控制策略相似, 都不是直接控制机器人与外部环境之间的接触力, 而是通过机器人末端位姿 (或者速度) 与接触力之间的关系, 来调整位姿和速度误差, 从而达到控制接触力的目的。该力控制过程中的弹性变形非常重要, 这里主要是要研究力/运动转换矩阵  $\mathbf{K}$ 。矩阵  $\mathbf{K}$  秩越大, 控制系统越柔, 容易实现力控制; 矩阵  $\mathbf{K}$  秩越小, 控制系统越刚, 容易实现位姿控制。对于这样一种刚柔相济的力控制系统<sup>[8]</sup>, 其设计的核心问题就是力/运动转换矩阵  $\mathbf{K}$ 。

设  $\Delta \mathbf{X} = (\Delta \mathbf{Y}, \Delta \mathbf{Z})^T$ , 根据力和运动之间的关系, 机器人和外界环境之间的接触力与位移的微分变化关系为:

$$\mathbf{F} = \mathbf{K}_p \Delta \mathbf{X} + \mathbf{K}_v \Delta \dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}_d \Delta \ddot{\mathbf{X}} \quad (4)$$

在气囊抛光过程中, 要求进给运动机器人的关节速度和角加速度较小, 所以可以只考虑位置项的作用, 而忽略阻尼项和惯性项的作用, 即不考虑气囊抛光工具与外界环境之间接触的瞬态关系<sup>[9]</sup>。因此在式(4)中, 可以忽略速度项和加速度项对接触力的影响, 故有:

$$\mathbf{F} = \mathbf{K}_p \Delta \mathbf{X} \quad (5)$$

上式建立了力控制中位移与接触力的关系, 这种力控制可通过如图2所示的力外环伺服控制方案实现。

图2中的力控制方案采用力外环控制, 其中  $H(s)$  为传感器传递函数, 预期力  $\bar{\mathbf{F}}_d$  与实际接触力  $\bar{\mathbf{F}}$  的误差当作力控制器  $\mathbf{G}_f(s)$  的输入,  $\mathbf{G}_f(s)$  的输出为位置修正量  $\bar{\mathbf{X}}_r$ , 它与位置给定量  $\bar{\mathbf{X}}_d$  相加后作为机器人位姿伺服控制系统的输入  $\bar{\mathbf{X}}_i$ 。机器人与外部环境之间的接触力  $\bar{\mathbf{F}}$  是由气囊抛光工具末端实际位置  $\bar{\mathbf{X}}$  与环境约束位置  $\bar{\mathbf{X}}_o$  的误差所引起的, 接触力大小与机器人刚度、位置伺服系统刚度以及环境刚度有关<sup>[10]</sup>。如果是

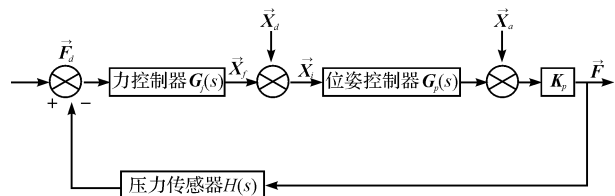


图2 力外环伺服控制系统框图

刚性环境的话,则接触力取决于机器人刚度和位置伺服系统刚度的合成刚度  $K_s$ 。力控制器设计是指给定位姿控制器  $G_p(s)$  和合成刚度  $K_s$ ,需设计适当的力控制规律  $G_f(s)$ ,以满足合成刚度  $K_s$  的要求。该控制系统对于输入  $\vec{F}_d$  和  $\vec{X}_d$  的响应为:

$$F(s) = K_p(G_f(s)G_p(s)F_d(s) + G_p(s)X_d(s) - X_0)J_0^{-1} \tag{6}$$

其中,  $J_0 = I + K_p H(s) G_f(s) G_p(s)$ ,所以系统合成刚度  $K_s$  为:

$$K_s = K_p G_p(s) J_0^{-1} \tag{7}$$

式中:  $K_p$ —系统合成刚度矩阵;  $G_p(s)$ —位姿控制系统传递矩阵;  $I$ —单位矩阵;  $G_f(s)$ —力控制器传递函数矩阵;  $K_s$ —力闭环刚度矩阵,可以通过调整控制规律  $G_f(s)$  来满足对系统合成刚度  $K_s$  的要求。

### 4 实验验证

为了验证该方案的可行性,本研究设计并搭建了一个能够对未知工件进行建模的实验平台,进行了模拟性实验。

实验系统的总体连接如图3所示。PC机和力跟踪控制器模块通过一条网线连接,多路舵机控制器模块和力跟踪控制器模块则用一条公对公的交叉串口线连接。

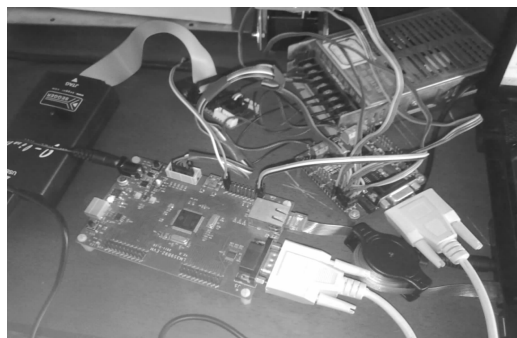


图3 实验系统总体连接图

该实验没有过多精度的追求,只是一个定性实验。考虑到该实验所用机器人的刚度问题,本研究采用气

球来代替抛光用的气囊,用一个碗作为工件来降低复杂度(碗底突出的一圈棱边不在实验采样的范围内),碗的下面罩着一铁块,作为夹具来固定碗。实验的过程如图4所示。

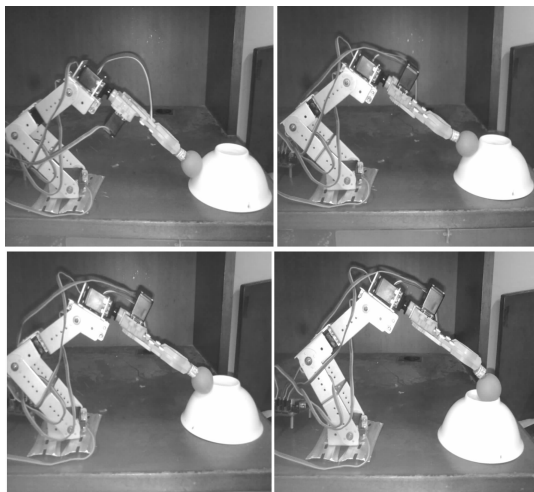


图4 实验过程图

机器人采用预定力跟踪控制算法对位置进行补偿,并根据机械臂的正运动学映射关系,这样就在预建模工件上取得了若干点,根据这些空间点坐标值,运用最小二乘法的曲面拟合算法对曲面片段进行拟合,从而得到重构后的工件几何信息如图5所示。

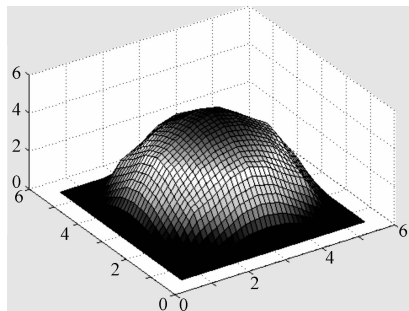


图5 实验结果图

### 5 结束语

本研究探讨了气囊抛光工件的几何信息重构,由分析结果可知,抛光工件未知表面重构、工件局部轨迹预测、力外环补偿控制都是典型的跟踪依从和主动柔顺控制问题。实验结果表明,基于位置补偿的力跟踪控制系统,能够较好地重构抛光工件的几何信息,验证了相关的理论研究和算法实现的可行性与有效性。

(下转第 654 页)

本文引用格式:

阮 航. 气囊抛光工件的几何信息重构研究[J]. 机电工程, 2014, 31(5): 591-594, 654.

RUAN Hang. Reconstruction of geometry information to gasbag polishing workpiece[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(5): 591-594, 654.

- by modified adomian decomposition method [J]. **Applied Mathematics and Computation**, 2002, 132(1):167-172.
- [17] 蒋耀林. 波形松弛方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [18] PRUVOST F, LAURENT-GENGOUX P, MAGOULES F, et al. Accelerated waveform relaxation methods for power systems [C]// 2011 International conference on Electrical and Control Engineering, 2011:2877-2888.
- [19] 舒继武, 薛巍, 郑纬民. 一种电力系统暂态稳定并行计算的优化分区策略 [J]. 电力系统自动化, 2003(19):6-10.
- [20] ZECEVIC A I, GACIC N. A partitioning algorithm for the parallel solution of differential-algebraic equations by waveform relaxation [J]. **Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, IEEE Transactions on**, 1999, 46(4):421-434.
- [21] GEORGE K V K. METIS: A Software Package for Partitioning Unstructured Graphs, Partitioning Meshes, and Computing Fill-Reducing Orderings of Sparse Matrices Version 4 [M]. 1998.
- [22] BARBARA C G J A R. Using OpenMP: Portable Shared Memory Parallel Programming [M]. Cambridge, MA: MIT Press, 2007.
- [23] DAVO T A, NATARAJAN E P. Algorithm 907: KLU a direct sparse solver for circuit simulation problems [J]. **ACM Transactions on Mathematical Software**, 2010, 3(37):1-17.
- [24] ZIMMERMAN R D, MURILLO S X, NACHEZ C E, et al. MATPOWER: steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education [J]. **Power Systems, IEEE Transactions on**, 2011, 26(1):12-19.
- [25] JI WU S, WEI X, WEI MIN Z. A parallel transient stability simulation for power systems [J]. **Power Systems, IEEE Transactions on**, 2005, 20(4):1709-1717.
- [26] HOU L, BOSE A. Implementation of the waveform relaxation algorithm on a shared memory computer for the transient stability problem [J]. **Power Systems, IEEE Transactions on**, 1997, 12(3):1053-1060.

[编辑: 李 辉]

**本文引用格式:**

刘云飞, 江全元, 陈跃辉, 等. 基于 Adomian 分解方法的暂态稳定并行仿真研究 [J]. 机电工程, 2014, 31(5):649-654.

LIU Yun-fei, JIANG Quan-yuan, CHEN Yue-hui, et al. Parallel transient stability simulation based on adomian decomposition method [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014, 31(5):649-654.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 594 页)

**致 谢**

值此论文完稿之际, 谨向在课题与论文完成过程中给予指导、关心、支持和帮助的老师、同学、朋友表示衷心的感谢!

首先要感谢我的导师王忠飞老师, 没有他的悉心指导和不断的鼓励, 本论文不可能顺利完成。另外, 还要感谢同实验室的师弟、师妹以及其他同学的帮助。

**参考文献 (References):**

- [1] WHITNEY D E. Perspective and state in robot force control [J]. **International Journal of Robotics Research**, 2007, 6(1):3-14.
- [2] NATALE C. Interaction Control of Robot: Six degrees-of-freedom [M]. Springer, 2006.
- [3] SEUL Jung, HSIA T C. Force tracking impedance control of robot manipulators under unknown environment [J]. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, 2004, 12(3):474-483.
- [4] YIN Y H, XU Y, JIANG Z H, et al. Tracking and Understanding Unknown Surface With High Speed by Force Sensing and Control for Robot [J]. **IEEE Sensors Journal**, 2012, 19(9):2910-2916.
- [5] PEREZ A, MCCARTHY J M. Dimensional Synthesis of Spatial RR Robots [M]. *Advances in Robot Kinematics*, Lenarcic J, Piran-Portoroz, Slovenia, 2000.
- [6] DOULGERI Z. Adaptive control of robot with on-line learning of surface [J]. **Automatica (Elsevier)**, 2009, 45(10):2374-2382.
- [7] 黄晓曦. 机器人主动柔顺控制研究 [M]. 南京: 南京航空航天大学出版社, 2008.
- [8] 殷跃红, 尉忠信, 朱剑英. 机器人柔顺控制研究 [J]. 机器人, 1998, 20(3):232-240.
- [9] 蔡自兴. 机器人学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000:5-9.
- [10] 陈伟强, 计时鸣, 金明生, 等. 气囊连续进动抛光的转换模块设计 [J]. 轻工机械, 2013, 31(1):24-28.

[编辑: 张 翔]