

柔性支撑三维机动目标的解耦跟踪预测算法

段学超, 仇原鹰, 段宝岩

(西安电子科技大学电子装备结构教育部重点实验室, 710071, 西安)

摘要: 为了克服因忽略各自由度的耦合本质而引入的预测误差, 基于并联机构学原理, 提出了一种柔性支撑三维机动目标跟踪预测算法. 该算法将运动目标假定为 6 自由度并联机器人的末端执行器, 在其解耦的关节空间进行驱动支链长度的预测, 通过并联机器人位置正解得出目标在将来时刻的位姿. 针对 500 m 口径球面射电望远镜馈源支撑与指向系统的两级复合控制模型进行数值仿真, 结果表明, 与传统预测方法相比, 该预测算法的精度提高了一倍, 运算时间为亚毫秒数量级.

关键词: 射电望远镜; 并联机器人; 三维机动目标; 跟踪预测

中图分类号: TN823; TP242 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)05-0592-05

Decoupled Tracking and Prediction Algorithm for Flexible Supporting Three Dimensional Maneuvering Object

DUAN Xuechao, QIU Yuanying, DUAN Baoyan

(Ministry of Education Key Laboratory of Electronic Equipment Structure, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: To remove the predicted errors due to neglecting the coupling character among the six degrees of freedom, a decoupled tracking and prediction algorithm based on the principle of parallel mechanism is presented, where the three dimensional object is treated as the end-effector of a suppositional six degrees-of-freedom full parallel manipulator. The lengths of actuating links are predicted in the decoupled joint space, then the future position of the object is obtained with forward kinematics of the suppositional parallel manipulator. Taking the two-stage compound control model of 500 m aperture spherical radio telescope feed supporting and orienting system as an example, the numerical simulation shows that the prediction accuracy is improved twice within a millisecond computing period.

Keywords: radio telescope; parallel manipulator; three dimensional maneuvering object; tracking and prediction

口径为 500 m 的球面射电望远镜(FAST)为国际平方公里天线阵计划提供了有效的机电光一体化工程的解决方案^[1-2], 并且已通过国家大科学工程立项. FAST 的馈源支撑结构由两级调整系统构成, 首先通过大跨度悬索驱动的巨型并联机构对馈源舱进行粗调定位, 然后采用装置在馈源舱底部的二级精调 Stewart 平台对安装在其下平台上的馈源空间动态定位误差进行实时补偿, 从而保证了馈源的高精度($R_{ms} \leq 4$ mm)定位. 从并联机构学的观点来看,

Stewart 平台的机构学特性、设计制造、数控技术目前已达到可实现虚拟轴机床的程度^[3-6]. 因此, FAST 这一柔性宏微并联机构的最终定位精度取决于馈源舱位姿的精确测量和实时反馈.

由于悬索的非线性、大滞后和柔性的本质, 当柔性约束的馈源舱受到外界扰动时, 其运动学、动力学方程难以描述, 因此不能直接应用机动目标跟踪理论的既有理论成果^[7], 而必须针对这一特殊对象单独进行研究. 文献^[8-9]运用对过去 3 个位姿点的测

量值,差分出基座小车的速度和加速度值,将小车在短时间段内的运动视为线性匀加速运动,从而预测出下一时刻点基座小车的位姿.由于三维运动目标各自由度的耦合特性,因此预测的精度有限且不能用于运动速度快的目标.文献[10]在预测过程中基于馈源舱运动轨迹的数学模型,并增加了一个 H_∞ 滤波算法,但是预测结果受到模型准确程度的影响,且算法的实时性局限于系统硬件.鉴于以上算法对三维目标的运动耦合特性考虑不足,以及常规的速度差分易于引入噪声信号、滤波算法实时性差等缺点,本文在惯性坐标系下构造了一个以馈源舱为末端操作平台的刚性并联机器人,将其耦合的三维运动在6条支链上进行解耦.采用非线性跟踪微分器提取各个支链的速度、加速度,在解耦的支链空间对驱动支链的长度进行预测,从而提高了预测精度,并具有良好的实时性.

1 宏微并联机构复合预测控制律

如图1所示,馈源跟踪射电源运动时,天文学上要求其位姿 ${}^w p(t)$ 以 $R_{\text{ms}} \leq 4 \text{ mm}$ 的精度跟踪射电源轨迹,而6自由度Stewart平台当前时刻 t 的控制量是 $t + \Delta t$ 时刻天文轨迹和馈源舱位姿的函数,前者已有既定的数学表达式,后者则是柔索支撑系统在外界随机扰动以及与Stewart平台之间动力耦合作

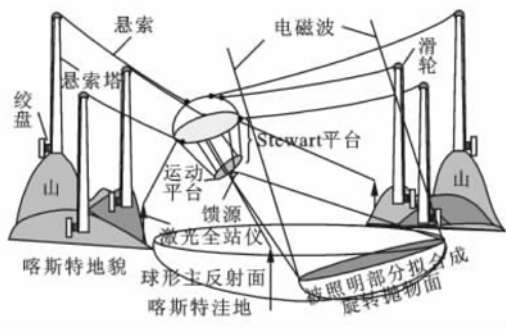


图1 FAST光机电一体化创新设计示意图

用的响应量.因此,有如下关系

$$\left. \begin{aligned} l_{ab}(t + \Delta t) &= g({}^w p(t + \Delta t), {}^w x_c(t + \Delta t)) \\ \Delta l_{ab} &= l_{ab}(t + \Delta t) - l_{ab}(t) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $l_{ab}(t)$ 为6条支链当前时刻的长度向量; ${}^w x_c(t + \Delta t)$ 为馈源舱在惯性坐标系中下一时刻的位姿; $g(\cdot)$ 为馈源支撑结构的运动学函数.

由此可见,对 ${}^w x_c(t + \Delta t)$ 的预测精度直接影响馈源的最终定位精度,而预测算法的实时性也决定了精调Stewart平台的控制周期的选取.因此,研究高精度、实时性强的预测算法对于提高馈源定位精

度有着重要的工程价值.

2 三维目标跟踪预测的传统方法

作为三维机动目标的馈源舱具有6个自由度,因此在 Δt 时间段内将其运动考虑为匀加速直线运动,则用传统方法预测得到其下一时刻的位姿为

$$\begin{aligned} {}^w \tilde{x}_i(t + \Delta t) &= {}^w x_i(t) + v_i(t)\Delta t + 0.5a_i(t)\Delta t^2 \\ i &= 1, 2, \dots, 6 \end{aligned} \quad (2)$$

式中: ${}^w \tilde{x}_i$ 为第 i 个自由度方向的预测值; $v_i(t)$ 、 $a_i(t)$ 分别为第 i 个自由度方向的速度(或角速度)、加速度(或角加速度).速度和加速度信息则由三点位置差分法进一步确定,即

$$v_c(t) = \frac{1.5{}^w x_c(t) + 0.5{}^w x_c(t - 2\Delta t) - 2{}^w x_c(t - \Delta t)}{\Delta t}$$

式中: ${}^w x_c(t)$ 和 ${}^w x_c(t - \Delta t)$ 为光学测量设备Leica激光全站仪得到的位姿序列.当前加速度则用速度差分估计

$$a_c(t) = \frac{v_c(t) - v_c(t - \Delta t)}{\Delta t}$$

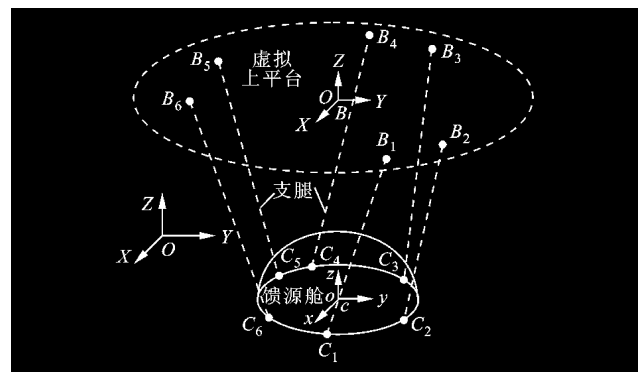
由式(2)得出馈源舱下一时刻的位姿.

3 并联机构学的解耦跟踪预测算法

3.1 构造良性条件数虚拟Stewart平台并联机构

三维目标预测方法存在2个明显的缺点:①忽略了馈源舱三维运动各自由度的耦合特性,破坏了馈源舱上各点的几何约束条件;②用以提取速度、加速度信息的常规差分运算对测量噪声有放大作用,且控制周期越短,该放大作用越强.

为了克服第①个缺点,以馈源舱为并联机构操作器构造的Stewart平台如图2所示.根据并联机



$C_1 \sim C_6$:虚拟下平台铰接点; $B_1 \sim B_6$:虚拟上平台铰接点

图2 虚拟6自由度的Stewart平台

构学知识,各支链的长度矢量为

$${}^w l_i = {}^w p + {}^w c R^c c_i - {}^w b_i \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (3)$$

式中: ${}^w\mathbf{R}$ 为坐标系 $cxyz$ 到 $OXYZ$ 的姿态旋转变换矩阵; ${}^c\mathbf{c}_i$ 为下平台铰接点 C_i 在 $cxyz$ 内的位置矢量; ${}^w\mathbf{b}_i$ 为上平台铰接点 B_i 在 $OXYZ$ 内的位置矢量. 各支链的长度为

$$l_i = \|\mathbf{l}_i\| \quad i = 1, 2, \dots, 6$$

该过程称作并联机构的位置逆解.

基于并联机构学原理的预测方法, 首先通过位置逆解运算, 由激光全站仪测量得到的馈源舱位姿得出 6 条支链的长度, 然后在支链空间内, 对未来时刻的各支链长度进行预测, 最后由 6 条支链的预测长度通过并联机构的位置正解过程得出馈源舱的预测位姿.

从并联机构学角度来看, Stewart 平台的构型影响着支链空间误差和馈源舱三维空间误差的映射关系^[3,11]. 由运动学方程可导出并联机构误差模型

$$\Delta \mathbf{l} = \mathbf{J} \Delta \mathbf{c} + \mathbf{J}_s \Delta \mathbf{x} \quad (4)$$

式中: $\Delta \mathbf{l}$ 和 $\Delta \mathbf{c}$ 分别为支链长度误差矢量和馈源舱定位误差矢量; $\Delta \mathbf{x}$ 是铰接点位置误差矢量; $\mathbf{J}$ 和 $\mathbf{J}_s$ 分别为 $\Delta \mathbf{x}$ 和 $\Delta \mathbf{c}$ 的误差因子, $\mathbf{J}$ 为 6×6 雅可比矩阵, $\mathbf{J}_s$ 为 6×36 误差映射矩阵^[11]. 通过优化铰接点的分布, 避免了 Stewart 平台在其工作空间内的奇异性, 即 $|\mathbf{J}| \neq 0$, 故

$$\Delta \mathbf{c} = \mathbf{J}^{-1} \Delta \mathbf{l} - \mathbf{J}^{-1} \mathbf{J}_s \Delta \mathbf{x} \quad (5)$$

由于虚拟 Stewart 平台的铰接点为理想的, 因此不存在误差, 即

$$\Delta \mathbf{x}_i = 0 \quad i = 1, 2, \dots, 36 \quad (6)$$

因此, Stewart 平台位于某一固定位姿时, 其关节空间到操作空间的误差映射由雅可比矩阵决定.

文献[11]定义了并联机构在不同位形下的运动精度评价指标, 本文采用表示误差来传递各向同性的误差方向敏感系数, 以确定良性工作空间

$$C_{in} = \sigma_{\max}(\mathbf{J}) / \sigma_{\min}(\mathbf{J})$$

定义

$$\bar{d}(\cdot) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_{in}(\mathbf{J}(c(i))) \quad (7)$$

式中: $\sigma_{\max}(\mathbf{J})$ 、 $\sigma_{\min}(\mathbf{J})$ 分别表示矩阵的最大、最小奇异值; $\bar{d}(\cdot)$ 是并联机器人在设计空间内的平均误差方向敏感系数; n 为球形工作空间内的采样点个数. 铰接点的位置矢量为

$$\begin{aligned} {}^c\mathbf{c}_i &= (r_p \cos(\pm i\alpha_p/2), r_p \sin(\pm i\alpha_p/2), 0)^T \\ {}^w\mathbf{b}_i &= (k_r r_p \cos(\pm i\alpha_b/2), k_r r_p \sin(\pm i\alpha_b/2), \\ &\quad k_h r_p + z_c)^T \end{aligned}$$

式中: r_p 为 C_i 点分布圆的半径; α_p 为 C_{2i-1} 、 C_{2i} 点的

圆心角; k_r 为 B_i 点分布圆的半径; α_b 为 B_{2i-1} 、 B_{2i} 点对应的圆心角, $i=1, 2, 3$; k_h 为 Stewart 平台机构的零初始高度 h_0 与 r_p 的比值. 建立离线优化模型, 用以确定具有良性工作空间的 Stewart 平台参数

$$\left. \begin{aligned} &\text{find } \mathbf{x}_d = [\alpha_p, \alpha_b, r_p, k_h, k_r]^T \\ &\min \bar{d}(\mathbf{x}_d) \\ &\text{s. t. } L_{d_j} \leq x_{d_j} \leq U_{d_j} \quad j = 1, 2, \dots, 5 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: L_{d_j} 和 U_{d_j} 分别表示第 j 个优化参数的上、下边界.

3.2 支链长度的非线性跟踪微分器

在支链关节空间, 各支链的长度按下式预测

$$\begin{aligned} \tilde{l}_i(t + \Delta t) &= l_i(t) + v_{li}(t) \Delta t + 0.5 a_{li}(t) (\Delta t)^2 \\ i &= 1, 2, \dots, 6 \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $\tilde{l}_i$ 为第 i 个支链长度的预测值; $v_{li}(t)$ 、 $a_{li}(t)$ 为第 i 个支链长度的变化速度、加速度.

从位置或速度信号中得到加速度信号时, 需要经过差分运算, 而常规的差分运算对噪声存在着放大作用的缺点. 因此, 采用具有高质量微分信号提取功能的非线性跟踪微分器, 从支链长度值列中提取支链的速度和加速度.

跟踪微分器(TD)是自抗扰控制器(ADRC)的重要组成部分^[12], 其作用是为了更好地解决在实际工程中, 由不连续或带随机噪声的测量信号合理提取连续信号及微分信号的问题. 对于任何有界可积函数, 二阶跟踪微分器^[12]给出的跟踪信号和速度信号为

$$\left. \begin{aligned} u_1(k+1) &= u_1(k) + h u_2(k) \\ u_2(k+1) &= u_2(k) + h f(u_1(k) - u(k), \\ &\quad u_2(k), \delta, h) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: h 为采样步长; δ 为决定过渡过程快慢的参数. 非线性函数的定义如下

$$f(u_1, u_2, \delta, h) = \begin{cases} -\delta \operatorname{sgn}(a) & |a| > d \\ -\delta a/d & |a| \leq d \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 为符号函数; a 与 d 由下式确定

$$\left. \begin{aligned} a &= \begin{cases} u_2 + \frac{a_0 - d}{2} \operatorname{sgn}(u_3) & |u_3| > d_0 \\ u_2 + u_3/2 & |u_3| \leq d_0 \end{cases} \\ &\quad \left. \begin{aligned} d &= h\delta, d_0 = hd \\ u_3 &= u_1 + h u_2 \\ a_0 &= (d^2 + 8\delta |u_3|)^{1/2} \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

其中 $t = kh$ 表示时间, k 为采样点. $\delta = 25\ 000$, 初始状态 $u_1(0) = 0$, $u_2(0) = 0$. 由于本算法需要提

取支链长度的二阶微分信号,因此采用结构完全相同的2个二阶跟踪微分器串联来实现所需的功能。

3.3 虚拟 Stewart 平台的实时位置正解算法

虚拟 Stewart 平台在其无奇异点的工作空间内运动,假设本次运动是从初始位点 $\mathbf{c}^0$ 经过支链协调动作后,到达当前位姿 $\mathbf{c}^d$,此时各支链的长度矢量为 $\mathbf{l}^d$ 。理论上 $\mathbf{c}^0$ 可选为工作空间内的任一点, $\mathbf{l}^d$ 的各分量则由以上公式预测得出。按照正解算法的任务是根据 $\mathbf{c}^0$ 、 $\mathbf{l}^d$ 求解出末端执行器的位姿 $\mathbf{c}^d$:①已知 $\mathbf{c}^0$, 给定算法的收敛精度($\epsilon > 0$),令 $k=0$;②通过运动学逆解体系计算 $\mathbf{l}^k$,得到 $\Delta \mathbf{l}^k = \mathbf{l}^d - \mathbf{l}^k$;③计算 $\mathbf{s}^k = -\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{c}^k)\Delta \mathbf{l}^k$,若 $\|\mathbf{s}^k\| \leq \epsilon$,则停止,此时 $\mathbf{c}^d = \mathbf{c}^k$,否则,转④;④ $\mathbf{c}^{k+1} = \mathbf{c}^k + \mathbf{s}^k$,若 $k=k+1$,则转②。

4 算例分析

反射面口径为 50 m 的 FAST 缩比模型的馈源舱口径为 1 m,采用自适应遗传算法对组合优化式(8)进行求解,得出具有良性工作空间的 Stewart 平台尺寸

$$\begin{aligned}\alpha_p &= 28.5^\circ, \alpha_b = 92.1^\circ, r_p = 0.86 \text{ m} \\ k_h &= 5.45, k_r = 3.6\end{aligned}$$

天文学给定的馈源相位中心的运动方程^[2]为

$$\begin{aligned}x &= 0.533r_c(\sin\varphi\cos\sigma\cos H_t - \cos\varphi\sin\sigma) \\ y &= 0.533r_c\cos\sigma\sin H_t \\ z &= r_c - 0.533r_c(\cos\varphi\cos\sigma\cos H_t + \sin\varphi\sin\sigma)\end{aligned}\quad (14)$$

式中: $r_c=50$ m 为反射面曲率半径; $\varphi=25^\circ$ 为观测点地理纬度; $\sigma=30^\circ$ 为射电源的赤纬; $-45^\circ \leq H_t \leq 45^\circ$ 为射电源的时角。

为了逼近真实工况,假定馈源舱的参考中心点和其姿态的振动为

$$\begin{aligned}\Delta x(t) &= 30\sin(3.0\pi t) + 10\text{rand} \\ \Delta y(t) &= 40\sin(4.0\pi t) + 10\text{rand} \\ \Delta z(t) &= 45\sin(3.0\pi t) + 10\text{rand} \\ \phi(t) &= 10\sin(2.4\pi t) + 1.5\sin(5\pi t) + 5\text{rand} \\ \theta(t) &= 10\sin(3.0\pi t) + 1.4\sin(5\pi t) + 5\text{rand} \\ \psi(t) &= 10\sin(2.0\pi t) + 2.0\sin(5\pi t) + 5\text{rand}\end{aligned}$$

式中: t 为仿真过程的时间;rand 为均匀分布的伪随机函数。取 $h=0.02$ s, $t=6$ s,采用传统方法和本文所述方法对馈源舱的运动进行预测,并且与目标轨迹相比较,得出各自由度方向的预测误差,如图3所示。限于篇幅,本文只给出 x 方向的误差 Δx 和偏转角误差 $\Delta\theta$ 如图3a、图3b所示, xyz 各方向的综合误差 Δd 如图3c所示。

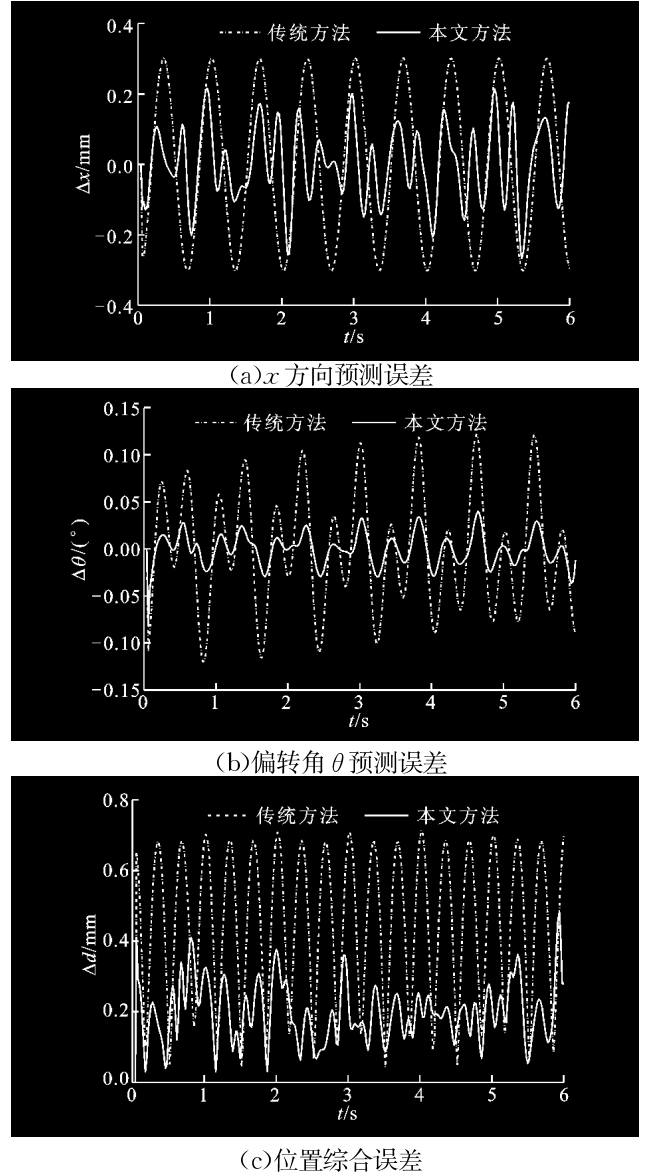


图3 两种预测方法结果的对比

由图3可知,采用本文方法可以将位置预测误差的幅值降低约一半,角度预测误差降低一半以上。预测综合误差及均方根值则降低了一半以上。从误差曲线的形状来看,由于采用了非线性跟踪微分器,使得整个预测算法具有非线性,因此相对于传统方法,采用本文方法得出的结果曲线的周期性被大大削弱。本文对馈源舱做直线和圆周运动时的算例进行了分析,得出了与上述情况一致的效果。

从算法的实时性角度考虑,在处理器为 Pentium IV 2.8 GHz,主存储器为 512 MB RAM 的计算机上进行数值实验,结果表明,当对 1 000 个数据点进行运算时,算法消耗的总时间在亚毫秒数量级内,是复合控制完全可以接受的。

5 结束语

本文以三维机动目标为末端操作器构造并联机构,并在其支链空间采用非线性跟踪微分器对各支链长度进行预测,进而由并联机构位置正解原理预测出目标的将来时刻位姿,克服了传统跟踪预测方法忽略目标各自由度耦合特性的缺点.数值算例结果表明:本文提出的算法比传统方法预测精度提高了一倍以上,并且算法的实时性能够满足控制过程中在线跟踪预测的需要.

参考文献:

- [1] DUAN B Y. A new design project of the line feed structure for large radio telescope and its nonlinear dynamic analysis [J]. *Mechatronics*, 1999, 9(1): 53-64.
- [2] QIU Y Y, DUAN B Y, WEI Q, et al. Optimal distribution of the cable tensions and structural vibration control of the cable-cabin flexible structure [J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2002, 14(1): 39-56.
- [3] MERLET J P. *Parallel robots* [M]. Dordrecht, Holland: Kluwer Academic Publisher, 2000: 64-71.
- [4] TSAI L W. *Robot analysis the mechanics of serial and parallel robots* [M]. New York, USA: Wiley-Inter Science, 1999.
- [5] TING Y, CHEN Y S, JAR H C. Modeling and control for a Gough-Stewart platform CNC machine[J]. *Journal of Robotic Systems*, 2004, 21(11): 609-623.
- [6] YANG G L, CHEN I M, CHEN W H, et al. Kinematic design of a six-DOF parallel-kinematics machine with decoupled-motion architecture[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2004, 20(5): 876-884.
- [7] DUH F B, LIN C T. Tracking a maneuvering target using neural fuzzy network [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2004, 34(1): 16-33.
- [8] CHENG Y, REN G, DAI S L. Vibration control of Gough-Stewart platform on flexible suspension[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2003, 19(3): 489-493.
- [9] LU Y, ZHU W, REN G. Feedback control of a cable-driven Gough-Stewart platform [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2006, 22(1): 198-202.
- [10] 保宏,段宝岩,陈光达.具有慢速时滞机动目标三维跟踪[J]. *控制理论与应用*, 2006, 23(4): 526-530.
BAO Hong, DUAN Baoyan, CHEN Guangda. Three dimensional time-delay maneuvering target tracking in slow velocity [J]. *Control Theory and Applications*, 2006, 23(4): 526-530.
- [11] 李铁民,郑浩峻,汪劲松,等.并联机床不同位形下的运动精度评价指标[J]. *机械工程学报*, 2002, 38(9): 101-105.
LI Tiemin, ZHENG Haojun, WANG Jinsong, et al. Precision measures for various configurations of parallel kinematic machine tools[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 38(9): 101-105.
- [12] 韩京清.自抗扰控制技术[J]. *前沿科学*, 2007, 1(1): 24-31.
HAN Jingqing. Auto disturbances rejection control technique [J]. *Frontier Science*, 2007, 1(1): 24-31.

(编辑 管咏梅)

[文摘预登]

离心叶轮速度系数对级性能影响的研究

胡小文, 闻苏平, 席光

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

研究了离心压缩机叶轮速度系数对离心压缩机级性能的影响,分析了速度系数变化对叶轮流道内部流动的影响.研究表明:在叶轮轮盖的相对曲率半径大于0.3时,叶轮速度系数的减小能改善叶轮流道内部气体流动,离心压缩机的级效率得到明显提高,通过对不同速度系数的压缩机级的变工况性能进行分析,发现速度系数的减小使得压缩机级性能曲线右移,有效地扩大了离心压缩机的工况范围.