文章编号: 1000-8152(2004)06-0956-05

大射电望远镜馈源指向系统轨迹跟踪自抗扰控制

苏玉鑫[1], 段宝岩[1], 张永芳[1], 南仁东[2], 彭 勃[2]
(1.西安电子科技大学 机电工程学院,陕西 西安 710071; 2.中国科学院 国家天文台,北京 100012)

摘要: 采用独立控制策略实现新一代大射电望远镜馈源指向跟踪系统的高精度轨迹跟踪.将两组成子系统之间的动力学耦合及其他扰动视为对精调Stewart平台子系统的未知扰动,设计了强鲁棒自抗扰控制器实现扰动补偿.大射电望远镜馈源指向系统50m缩比模型实验,验证了独立控制策略和自抗扰控制器的工程有效性和可行性.为将来建造新一代大射电望远镜工程奠定了坚实的基础.

关键词: 宏-微机器人系统; 轨迹跟踪; 自抗扰控制; 机电一体化
中图分类号: TP271 **文献标识码**: A

Auto-disturbances rejection control of the feed-supporting system for the square kilometre array

SU Yu-xin[1], DUAN Bao-yan[1], ZHANG Yong-fang[1], NAN Ren-dong[2], PENG Bo[2]
(1. School of Electro-Mechanical Engineering, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China;
2. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: An independent control strategy is proposed to realize the high-precision tracking control of the feed-supporting system for the square kilometre array (SKA). The dynamic couplings between the two comprised subsystems along with any other disturbances are considered as the unknown disturbances to the fine tuning subsystem. A high robust auto-disturbance rejection controller (ADRC) is designed to realize the disturbances compensation, which consists of a tracking differentiator (TD) in the feedforward path, an extended state observer (ESO) and a nonlinear proportional-derivative (NPD) control in the feedback path. The TD solves the difficulties posed by low-order reference trajectories which are quantized at the sensor resolution, and the ESO provides the estimate of the unmeasured system's state and the real action of the unknown disturbances only based on a measurement output of the system. The effectiveness and engineering feasibility of this independent control strategy and ADRC are verified by the experimefntal results of a scaled model of SKA with the diameters of 50m. The superior tracking precision has laid a solid base for the engineering accomplishment of SKA.

Key words: macro-micro manipulators; tracking control; auto-disturbance rejection control; mechatronics

1 引言(Introduction)

新一代大射电望远镜工程是一个总接收面积达一平方公里的国际合作项目(Square kilometre array, SKA)[1].SKA的出现,必将对现代通讯、雷达技术等产生深远的影响,带来巨大的经济与社会效益.为此,各国都致力于SKA项目的早日启动,国际上把其称为天文学界的"奥林匹克竞赛"[1~3].目前,美、加、澳、荷、中等十个国家正积极参与,都提出了本国的SKA方案与计划,投入大量的人力、物力积极争取SKA建在自己的国家.

鉴于贵州特有的喀斯特地貌,结合现代的计算机、自动控制与激光检测技术,段宝岩教授提出了全新的SKA机电光一体化设计方案来实现SKA的科学目标[1~5].但由于采用大跨度悬索驱动来保证馈源轨迹跟踪精度,存在较大的滞后,所以仅靠悬索驱动调整,很难保证馈源轨迹跟踪高精度要求(稳态跟踪精度4 mm).经过多次论证,基于悬索支撑机电光一体化设计方案,确定了如下的新一代大射电望远镜并联宏-微馈源指向系统方案[3~6]: 并联悬索-馈源舱子系统提供较大的工作空间,并实现馈源轨

收稿日期:2003-03-05; 收修改稿日期:2004-03-24.
基金项目:国家自然科学基金项目(50075065);中国科学院知识创新工程重大项目"大射电望远镜FAST工程预研究"项目;中国科学院机器人学重点实验室基金项目(RL200104);陕西省自然科学基金项目(2000C22).

迹跟踪的粗调;精调 Stewart 平台子系统在悬索粗调的基础上,确保安放在精调 Stewart 平台动平台上的馈源高精度轨迹跟踪的实现.

本文中采用独立控制策略实现馈源指向系统的高精度轨迹跟踪控制,设计了强鲁棒性自抗扰控制器实现两组成子系统的动力学耦合及其它未知扰动补偿.通过新一代大射电望远镜 50 m 缩比模型实验验证了控制策略和控制器的工程有效性和可行性.

2 控制策略(Control strategy)

新一代大射电望远镜馈源指向系统的轨迹跟踪速度仅为 1 ~ 2 cm/s,并基于 Stevens 与 How 的研究成果[7],采用易于工程实现的独立控制策略实现馈源高精度轨迹跟踪控制,如图 1 所示.

首先将馈源的期望轨迹确定为精调 Stewart 平台子系统的跟踪轨迹,然后,根据初始时粗、精两组成子系统之间的静止几何关系,确定悬索-馈源舱粗调子系统的跟踪轨迹.通过激光全站仪实现馈源舱的动态检测,并将馈源舱的位姿信息分别反馈给粗、精调子系统,从而使得粗调子系统实现大闭环控制,为精调子系统的高精度轨迹跟踪奠定坚实的基础.精调子系统的控制反馈量由精调变位执行器伺服电机上的编码器给出.

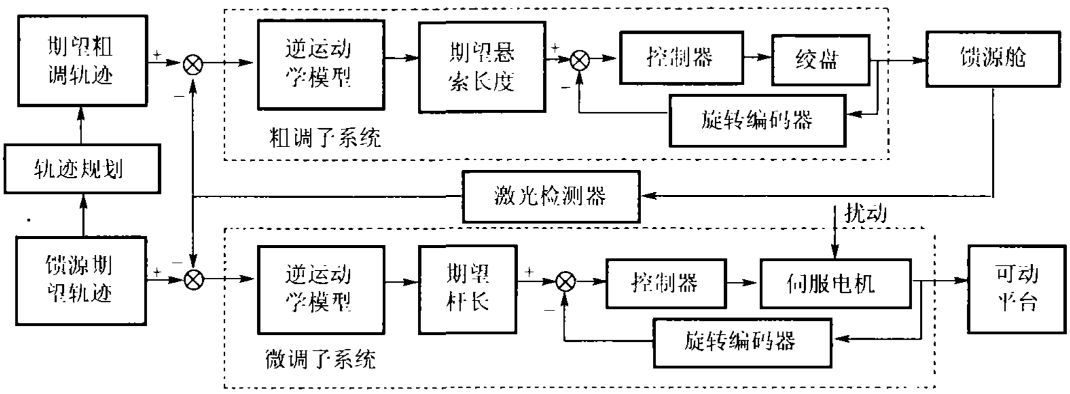

图 1 宏-微机器人系统轨迹跟踪独立控制方案

Fig. 1 Independent control strategy for macro-micro manipulators system

鉴于对悬索-馈源舱粗调子系统轨迹跟踪控制已经进行了深入研究,并取得了较理想的结果[8,9],本文主要阐述精调子系统的高精度轨迹跟踪控制及 50 m 仿真模型实验结果.

3 运动控制模型(Kinematic model)

为了描述馈源舱和精调 Stewart 平台的动平台在空间的位姿,分别在馈源舱和精调 Stewart 平台的动平台的中心建立两个直角坐标系 $O\text{-}XYZ$ 和 $p\text{-}xyz$. 在各自坐标系中,精调 Stewart 平台的变位执行器馈源舱和动平台的铰接点坐标分别为 $\boldsymbol{a}_i$ 与 $\boldsymbol{b}_i$. 馈源舱和精调 Stewart 平台动平台的位姿相对于大地坐标系 $W\text{-}XYZ$ 可描述为 ${}_wX^b(t)$ 与 ${}_wX^p(t)$. 其中, ${}_wX^b(t)$ 即为激光全站仪测得的馈源舱的实际位姿, ${}_wX^p(t)$ 为馈源所在的动平台的期望位姿. 根据坐标变换关系[10],铰接点 $\boldsymbol{a}_i$ 与 $\boldsymbol{b}_i$ 相对于大地坐标系 $W\text{-}XYZ$ 的坐标可表示为[6]

$$ {}_w\boldsymbol{a}_i = {}^w\boldsymbol{P}_O + R^b \cdot \boldsymbol{a}_i, \quad (1) $$

$$ {}_w\boldsymbol{b}_i = {}^w\boldsymbol{P}_p + R^p \cdot \boldsymbol{b}_i. \quad (2) $$

式中, ${}^w\boldsymbol{P}_O$ 与 ${}^w\boldsymbol{P}_p$ 分别为两坐标系 $O\text{-}XYZ$ 和 $p\text{-}xyz$ 相对于大地坐标系 $W\text{-}XYZ$ 的位置向量; $\boldsymbol{R}^b$, $\boldsymbol{R}^p$ 分别为馈源舱与动平台各自坐标系与大地坐标系之间的姿态变换矩阵,可表示为如下的函数[4,10]:

$$ R = \begin{bmatrix} \cos\Psi\cos\theta & -\sin\Psi\cos\theta & \sin\theta \\ \sin\Psi\cos\phi+\cos\Psi\sin\theta\sin\phi & \cos\Psi\cos\phi-\sin\Psi\sin\theta\sin\phi & -\cos\theta\sin\phi \\ \sin\Psi\sin\phi-\cos\Psi\sin\theta\cos\phi & \cos\Psi\sin\phi+\sin\Psi\sin\theta\cos\phi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix}. $$

其中,分别用馈源舱与动平台各自的欧拉角代替上式的 Ψ, θ 与 ϕ, 即得各自的姿态变换矩阵.

至此,每根变位执行杆的长度可表示为如下的函数形式[4,6]:

$$ |\boldsymbol{l}_i| = |{}_w\boldsymbol{b}_i - {}_w\boldsymbol{a}_i|, \ i = 1,2,\cdots,6. \quad (3) $$

4 自抗扰控制器设计(ADRC design)

大射电望远镜馈源指向系统两组成子系统之间存在着动力学耦合作用,此外,随机风扰对精调 Stewart 平台的轨迹跟踪精度也有一定的影响.本文将两组成子系统之间的动力学耦合及其他的随机风扰等扰动,都视为对精调子系统的未知扰动,在精调 Stewart 平台关节空间设计了强鲁棒性自抗扰控制器(ADRC),实现了馈源轨迹高精度跟踪.

ADRC 主要由前馈非线性跟踪微分器(Tracking differentiator, TD)、反馈回路的扩张状态观测器(Extended state observer, ESO)和非线性 PD(Nonlinear PD, N-PD)组成[11,6],如图 2 所示.

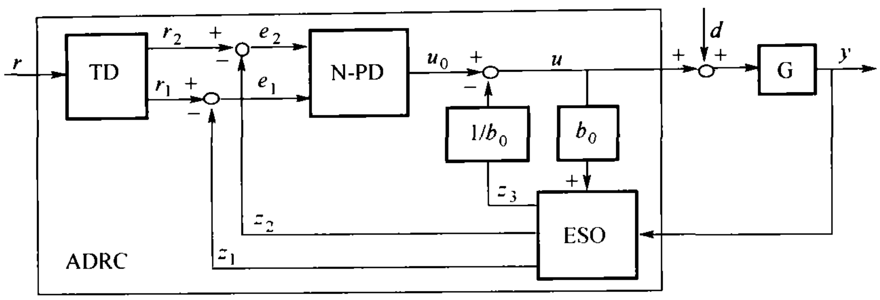

图 2 ADRC 自抗扰制器的结构简图

Fig. 2 Structure diagram of ADRC

4.1 非线性跟踪微分器(TD)(Nonlinear tracking differentiator)

前馈 TD 的主要作用是对于给定的输入信号,安排系统的过渡过程,并提取参考输入信号 r_1 及高质量的微分信号 r_2,消弱测量噪声对控制性能的影响.前馈 TD 离散的输出方程为[12,6]

$$\begin{cases} r_1(k+1) = r_1(k) + hr_2(k), \\ r_2(k+1) = r_2(k) + hfst(r_1(k) - r(k), r_2(k), \delta, h). \end{cases} \tag{4}$$

其中, h 为采样步长;δ 为决定过渡过程快慢的参数;$fst(x_1, x_2, \delta, h)$ 为如下非线性函数:

$$fst(x_1, x_2, \delta, h) = -\begin{cases} \delta\,\mathrm{sgn}(a), & |a| > d, \\ \delta\,\dfrac{a}{d}, & |a| \leqslant d. \end{cases} \tag{5}$$

式中, sgn(·) 为符号函数;a 与 d 可以通过下式确定:

$$a = \begin{cases} x_2 + \dfrac{(a_0 - d)}{2}\mathrm{sgn}(y), & |y| > d_0, \\ x_2 + \dfrac{y}{h}, & |y| \leqslant d_0, \end{cases} \tag{6}$$

$$\begin{cases} d = \delta h, \\ d_0 = hd, \\ y = x_1 + hx_2, \\ a_0 = \sqrt{d^2 + 8\delta |y|}. \end{cases} \tag{7}$$

4.2 扩张状态观测器(ESO)(Extended state observer)

ESO 的作用是利用尽可能少的信息,估计出受未知外扰作用的非线性不确定对象的扩张状态,以实现反馈控制及扰动补偿.离散三阶 ESO 的一种具体实现形式为[13,6]

$$\begin{cases} \varepsilon_0 = z_1(k) - y(k), \\ z_1(k+1) = z_1(k) + h(z_2(k) - \beta_1\varepsilon_0), \\ z_2(k+1) = z_2(k) + h(z_3(k) - \\ \qquad \beta_3 fal(\varepsilon_0, \alpha_1, \delta_1) + b_0 u(k)), \\ z_3(k+1) = z_3(k) - h\beta_3 fal(\varepsilon_0, \alpha_2, \delta_1). \end{cases} \tag{8}$$

式中, $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \delta_1$ 与 b_0 为设计参数;非线性函数 $fal(\varepsilon, \alpha, \delta)$ 由下式给出:

$$fal(\varepsilon, \alpha, \delta) = \begin{cases} |\varepsilon|^{\alpha}\mathrm{sgn}(\varepsilon), & |\varepsilon| > \delta, \\ \dfrac{\varepsilon}{\delta^{1-\alpha}}, & |\varepsilon| \leqslant \delta. \end{cases} \tag{9}$$

4.3 非线性 PD(N-PD)(Nonlinear-PD)

获得高质量的微分信号后,采用如下的非线性组合实现 ADRC 初步的控制作用[11,6]:

$$\begin{cases} e_1 = r_1 - z_1, \\ e_2 = r_2 - z_2, \\ u_0 = b_{t1} fal(e_1, \alpha_{01}, \delta_0) + b_{t2} fal(e_2, \alpha_{02}, \delta_0). \end{cases} \tag{10}$$

其中,非线性函数 $fal(e, \alpha, \delta_0)$ 如式(9)所示. b_{t1}, b_{t2}, α_{01}, α_{02} 和 δ_0 为 N-PD 的设计参数.

4.4 扰动补偿控制输出(Disturbances compensation)

ESO 获得未知外扰的实时作用量后,可以实现扰动补偿.因此,ADRC 控制器的总输出为[11,6]

$$u(t) = u_0(t) - z_3/b_0. \tag{11}$$

5 实验结果(Experimental results)

考虑到将来长线通讯的限制,系统的采样周期确定为 h = 10 ms. 经过多次试验, ADRC 控制器的参数确定如下: $\delta = 250$; $b_0 = 0.1$, $\alpha_1 = 0.5$, $\alpha_2 = 0.25$, $\beta_1 = 40$, $\beta_2 = 150$, $\beta_3 = 300$, $\delta_1 = 0.00025$; $b_{t1} = 1500$, $b_{t2} = 1.00$, $\alpha_{01} = 0.75$, $\alpha_{02} = 1.5$, $\delta_0 = 0.02$. 新一代大射电望远镜宏 - 微馈源指向系统 50 m缩比模型如图 3 所示.

实验期望跟踪轨迹为一空间直线(在大地坐标系下的起点坐标为(587, - 482, 1352),终点坐标为(536, - 536, 1332),单位为 cm. 馈源舱的线速度为 1 cm/s,风速为 2.2 m/s,温度为 4 ℃,晴天.

限于经费的制约,实验过程中,采用四台 Leica 激光全站仪进行实时跟踪测量,其中测量馈源舱位姿的三台 Leica 激光全站仪的信号同时送给粗、精

调控制计算机实施控制,而测量精调 Stewart 平台动平台中心的第四台 Leica 激光全站仪的信号只作为检验用,并不进入精调控制系统的闭环控制中.馈源舱与动平台的期望轨迹与实际轨迹在 X-Y 平面内的对比情况如图 4 所示.轨迹跟踪误差分别如图 5~7 所示.

图 3　新一代大射电望远镜 50 m 缩比模型
Fig. 3　50 m scaled-model for the SKA

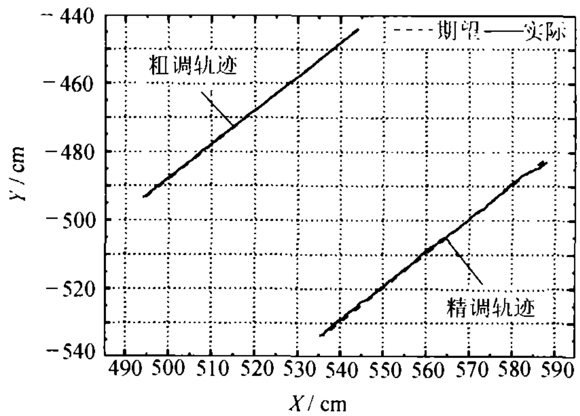

图 4　X-Y 平面内馈源指向跟踪系统期望轨迹与实际轨迹
Fig. 4　Macro-micro subsystems trajectories in X-Y plane

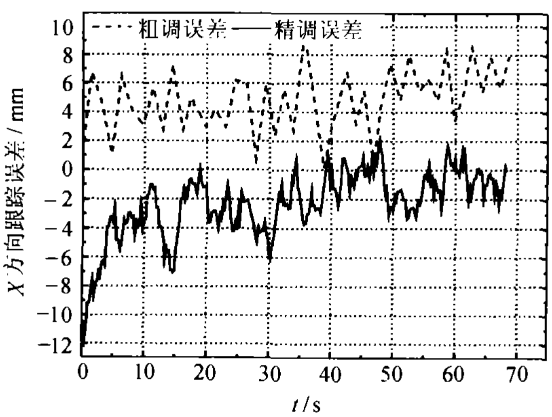

图 5　馈源舱中心与动平台中心 X 坐标跟踪误差
Fig. 5　Macro-micro subsystems tracking errors in X direction

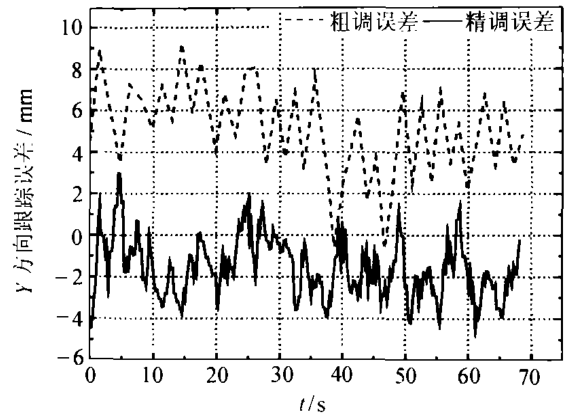

图 6　馈源舱中心与动平台中心 Y 坐标跟踪误差
Fig. 6　Macro-micro subsystems tracking errors in Y direction

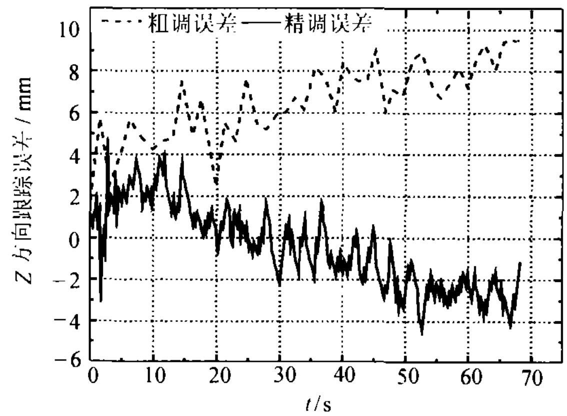

图 7　馈源舱中心与动平台中心 Z 坐标跟踪误差
Fig. 7　Macro-micro subsystems tracking errors in Z direction

可见,跟踪直线轨迹时,不计开始一段时间内因突然启动而引起的波动,进入稳态跟踪后,馈源舱中心的位置跟踪误差在 10 mm 以内,而下平台中心的位置误差基本在 4 mm 以内,只有极个别的点超过了 4 mm.精调 Stewart 平台的误差缩小功能明显.

从上面实验的结果可以看出,独立控制策略和自抗扰控制器是完全有效的,精调 Stewart 平台动平台中心的轨迹跟踪精度较高,在工程上是有效可行的.而且,限于时间的关系,上述结果的获得,都是建立在精调 Stewart 平台未严格标定的基础上的,存在一定的系统误差.如果采用一些已成熟的标定技术[14],对精调 Stewart 平台进行标定,精调轨迹的跟踪精度有望进一步提高.

6　结论(Conclusion)

采用独立控制策略实现新一代大射电望远镜馈源宏-微指向跟踪系统的高精度轨迹跟踪控制.将两组成子系统之间的动力学耦合及其它外扰都视为对精调子系统的未知扰动,在精调 Stewart 平台关节

空间设计了强鲁棒的自抗扰控制器,实现了动力学耦合及其它外扰的补偿,并采用非线性PD控制律形成控制作用.通过新一代大射电望远镜馈源指向系统50 m缩比模型实验,验证了独立控制策略和自抗扰控制器的工程有效性和可行性.在馈源舱中心粗调位置误差10 mm的基础上,精调Stewart平台动平台中心的位置误差可达4 mm以内,位置误差缩小功能明显.为将来建造新一代大射电望远镜500 m先导模型奠定了坚实的基础.

致谢(Acknowledgements):

衷心感谢中国科学院数学与系统科学研究院韩京清研究员在自抗扰控制器设计过程中给予的宝贵建议和精心指导.十分感谢北京理工大学丁洪生教授、肖定国教授、郝娟博士、李成刚博士生、李金泉博士生、付铁博士生在实验过程中给予的帮助.十分感谢解放军测绘工程大学郑勇教授、夏治国副教授、骆亚波研究生在实验测试上的帮助.

参考文献(References):

[1] NAN R D. *A Proposal of International LT Program* [M]. Beijing, China: Beijing Astronomy Observatory, 1995.

[2] QIU Yuhai. A novel design for a giant Arecibo-type spherical radio telescope with an active main reflector [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1998, 301(3): 827 - 830.

[3] DUAN B Y. A new design project of the line feed structure for large spherical radio telescope and its nonlinear dynamic analysis [J]. *Mechatronics*, 1999, 9 (1), 53 - 64.

[4] SU Y X, DUAN B Y. The application of Stewart platform in the large spherical radio telescope [J]. *J of Robotic Systems*, 2000, 17(7): 375 - 383.

[5] SU Y X, DUAN B Y, NAN R D, et al. Development of a pilot of an Arcebio-type large spherical radio telescopes for the square kilometer, array [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Int J of Mechanical Sciences*, 2001, 215(11): 1321 - 1329.

[6] 苏玉鑫.大射电望远镜精调Stewart平台的优化、分析与控制[D].西安:西安电子科技大学,2002.
(SU Yuxin. *Optimization, analysis and control of the Stewart platform for the SKA* [D]. Xi'an: Xidian University, 2002.)

[7] STEVENS H D, HOW J. The limitations of independent controller design for a multiple-link flexible macro-manipulator carrying a rigid mini-manipulator [C]// *Proc of the 2nd ASCE (American Society of Civil Engineers) Conf on Robotics for Challenging Environments*. [s.l.]: [s.n.], 1996: 93 - 99.

[8] 邱金波,段宝岩,彭勃,等.大型球面射电望远镜控制系统研究[J].自动化学报,2001,27(1): 93 - 97.
(QIU Jinbo, DUAN Baoyan, PENG Bo, et al. On control system of large radio telescope [J]. *Acta Automatica Sinca*, 2001, 27(1): 93 - 97.)

[9] 苏玉鑫,段宝岩.大射电望远镜馈源轨迹跟踪自适应控制[J].控制理论与应用,2002,19(1): 121 - 124.
(SU Yuxin, DUAN Baoyan. Adaptive predictive tracking control of feed for large radio telescope [J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(1): 121 - 124.)

[10] 熊有伦.机器人学[M].北京:机械工业出版社,1993.
(XIONG Youlun. *Robotics* [M]. Beijing: China Machine Press, 1993.)

[11] 韩京清.自抗扰控制器及其应用[J].控制与决策,1998,13(1): 19 - 23.
(HAN Jingqing. Auto-disturbances-rejection controller and it's applications [J]. *Control and Decision*, 1998, 13(1): 19 - 23.)

[12] 韩京清,袁露林.跟踪-微分器的离散形式[J].系统科学与数学,1997,19(3): 268 - 273.
(HAN Jingqing, YUANG L L. The discrete form of tracking-differentiator [J]. *J of Systems Science & Mathematical Science*, 1997, 19 (3): 268 - 273.)

[13] 韩京清.一类不确定对象的扩张状态观测器[J].控制与决策,1995,10(1): 85 - 88.
(HAN Jingqing. The "extended state observer" of a class of uncertain systems [J]. *Control and Decision*, 1995, 10(1): 85 - 88.)

[14] ZHUANG Hanqi. Self-calibration of parallel mechanisms with a case study on Stewart platforms [J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1997, 13(3): 387 - 397.

作者简介:

苏玉鑫 (1969 —),男,西安电子科技大学机电工程学院教授,2002年于西安电子科技大学获工学博士学位,2003年至2005年香港城市大学客座研究员,研究兴趣为机电控制及自动化、非线性控制与模糊控制,E-mail: yxsu@mail.xidian.edu.cn;

段宝岩 (1955 —),男,西安电子科技大学教授,博士生导师,校长,1989年于西安电子科技大学获工学博士学位,1991年至1994年,国家公派赴英国利物浦大学做博士后研究,期间赴日本北海道大学做客座研究员,主要研究方向包括:机电控制及自动化、面向工程广义优化设计及CAD/CAE, E-mail: byduan@xidian.edu.cn;

张永芳 (1972 —),女,2003年于西安电子科技大学获硕士学位;

南仁东 男,中国科学院国家天文台研究员,博士生导师;

彭 勃 男,中国科学院国家天文台研究员.