

文章编号: 1000-8152(2008)04-0661-04

基于最优化线性搜索的稳定步态规划方法

汤卿, 熊蓉, 褚健

(浙江大学工业控制技术国家重点实验室; 浙江大学信息学院先进控制技术研究所, 浙江杭州 310027)

摘要: 提出一种基于最优化线性搜索的方法规划人形机器人的步态. 通过对脚踝关节末端轨迹运动的规划和参考零力矩点(ZMP: zero moment point)轨迹的规划, 将最优化泛函极值问题转换成为基于非线性约束最优化的问题, 将连续空间多变量规划问题转换成为离散空间二维变量规划问题, 提出了一套能够在线规划步态的控制算法. 该算法的收敛性和稳定性在仿真和实物上都得到了验证.

关键词: 人形机器人; 步态规划; 最优化; 零力矩点(ZMP)

中图分类号: TP273 文献标识码: A

Stable biped walking based on linear search optimization algorithm

TANG Qing, XIONG Rong, CHU Jian

(State Key Laboratory of Industrial Control Technology, Zhejiang University; Institute of Advanced Process Control, College of Information Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China)

Abstract: Linear search optimal algorithm is used in the humanoid biped robot's gait planning. By planning the trajectory of both of the ankle and the zero moment point(ZMP), the functional extreme optimization problem and the continuous multi-dimension variable programming problem are respectively converted into a nonlinear optimization with nonlinear constraints, and a discrete two-dimension variable programming problem. An on-line gait planning is then proposed. Attractingness and stability are also verified on both simulation and physical robot.

Key words: humanoid robot; gait planning; optimization; zero moment point (ZMP)

1 引言(Introduction)

步行是人形机器人的基本功能和最大特征, 因此步态规划成为人形机器人研究领域的一个重要基础性问题. 由于双足人形机器人是一个工程上少有的高阶、非线性、非完整约束的多自由度系统^[1], 因此该问题的研究具有极大的挑战性.

稳定是步态的一个重要特征. Vukobratovic提出的ZMP(zero moment point)判据^[2]是一种动态平衡判据, 该判据已成为步行机器人是否能稳定行走的必要条件^[3~5]. 魏航信等^[6]用基于质心点的规划方法设计了机器人侧平面的运动规划. MU Xiuping等^[7]使用多项式拟合脚踝关节的运动轨迹, 通过设定脚踝初始结束的位置、速度来确定脚踝的轨迹, 假设髋关节的运动为水平运动, 直接拟定髋关节的运动轨迹, 通过几何关系确定机器人的步态. Huang Q^[8]等用3次样条插值的方法拟合脚踝关节的运动轨迹, 然后通过整体调整髋关节的运动轨迹来获得最大的ZMP稳定裕度. 胡凌云等^[9]在其基础上通过误

差学习的方法校正髋关节的位置. 以上的几种算法都属于离线规划方法, 不能在线直接修改运动的轨迹和参考ZMP轨迹.

本文以7连杆双足步行机器人为例, 先用多项式拟合脚踝关节, 并规划出相应的ZMP的运动轨迹, 再利用前一次最优化搜索得到的结果和参考ZMP的位置重新设定新一轮迭代的髋关节的坐标的迭代初值, 最后通过线性搜索算法生成机器人的运动步态. 该方法考虑了ZMP条件, 而且可以根据现场环境的实际情况在线生成步态. 方法的收敛性和稳定性在软件仿真和实物调试中都得以验证.

2 机器人的模型(Model of the robot)

本文所研究的机器人原形如图1所示. 机器人在侧向平面内的运动可以建模为一个7连杆模型, 包括上体、大腿、小腿和脚踝7根连杆. 全身18个自由度, 分别分布在手部6个、髋关节6个、膝关节2个、踝关节4个. 机器人的高度、各肢的长度、质量和重心位置分布均符合正常人的基本要求.

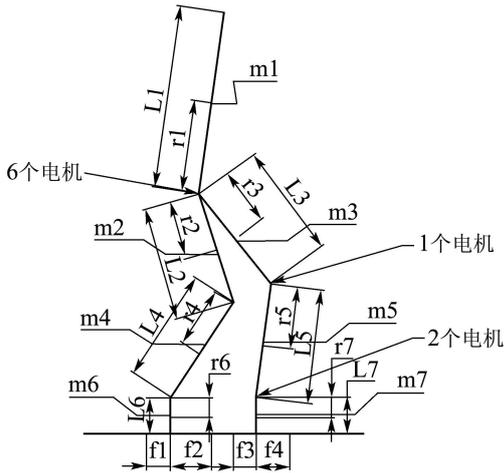


图1 机器人电机分布和物理参数定义
Fig. 1 The motors' distribution and physical parameters' definition of the robot

3 步态规划方法(Gait planning method)

3.1 步态规划准则—ZMP判据(ZMP criterion)

ZMP判据是机器人步态是否稳定的一个必要条件. ZMP是指地面对机器人沿垂直于地面方向的合力力矩为零的点. 在没有外力影响的情况下, 当ZMP落在脚的支撑域内时, 机器人的步态是稳定的^[2]. 连杆机器人ZMP的计算公式如下所示:

$$x_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g) x_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{x}_i z_i}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)}, \quad (1)$$

$$y_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g) y_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{y}_i z_i}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)}. \quad (2)$$

其中: $(x_{zmp}, y_{zmp}, 0)$ 为零力矩点, n 是连杆个数, m_i 是第 i 根连杆的质量, g 是重力加速度, (x_i, y_i, z_i) 是绝对笛卡尔坐标系空间中第 i 根连杆的质心坐标.

如果机器人在行走的过程中, ZMP能落在支撑域的中间, 就称机器人的稳定裕度最大. 从稳定的角度来说, 我们的目标是规划一个使机器人稳定裕度最大的步态.

考虑到人形机器人具有多自由度、非线性和高度耦合等特点, 对步态规划方法作以下3点假设:

- 1) 行走过程中机器人的上体保持竖直状态.
- 2) 行走过程中机器人脚踝关节以下部分也保持竖直, 保证机器人每次都是脚掌平稳着地.
- 3) 机器人的每一个状态都满足机器人的动态平衡条件—ZMP条件.

3.2 机器人步态脚踝关节的规划(Ankle joint planning)

机器人的步行是一个周期性的运动, 机器人脚踝关节的运动规划可以分为两个状态分别研究: 双脚支撑相和单脚支撑相. 在双脚支撑相中两脚都处于静止状态, 所以脚踝关节运动规划主要考虑单脚支撑相中摆动脚的运动规划, 设摆动脚的末端运动轨迹为

$$\begin{cases} x_a(t) = \\ a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 + a_6 t^6, \\ z_a(t) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + b_4 t^4 + b_5 t^5. \end{cases} \quad (3)$$

其中 $a_0, a_1, \dots, a_6, b_0, b_1, \dots, b_5$ 为待定系数.

根据需要, 设达到单脚支撑相中摆动脚的起始点、最高点和终止点的坐标分别为 (x_0, z_0, t_0) , (x_h, z_h, t_h) , (x_f, z_f, t_f) . 可以得到如公式(4)所示的边界条件:

$$\begin{cases} x_a(t_0) = x_0, x_a(t_h) = x_h, x_a(t_f) = x_f, \\ z_a(t_0) = z_0, z_a(t_h) = z_h, z_a(t_f) = z_f. \end{cases} \quad (4)$$

同时, 为了保证机器人的平滑起始, 并且在接触地面的时候和地面的相互作用最小化, 以减小机器人运动的不确定性, 还可以得到公式(5)所示的约束条件, 其物理含义为起始和结束的速度、加速度为零:

$$\begin{cases} \dot{x}_a(t_0) = 0, \ddot{x}_a(t_0) = 0, \\ \dot{x}_a(t_f) = 0, \ddot{x}_a(t_f) = 0, \\ \dot{z}_a(t_0) = 0, \dot{z}_a(t_h) = 0, \dot{z}_a(t_f) = 0. \end{cases} \quad (5)$$

通过求解方程(3)和(4)(5), 可以得到相应的机器人单脚支撑相摆动脚末端随时间运动方程(3)中的各项系数.

3.3 机器人参考ZMP的运动规划(Reference ZMP planning)

一个稳定的步态要求机器人的ZMP任何时刻都落在机器人的支撑域内. 通过调整参考ZMP的移动速度和脚末端的移动速度可以达到控制机器人行走速度的目的. 对于参考ZMP的选取没有太多苛刻的要求, 选择锯齿波形式作为ZMP轨迹的基本形式. 锯齿波位置位于支撑域的中间时, 机器人的稳定裕度达到最大.

3.4 最优化髋关节轨迹的生成(Generation the optimized hip trajectory)

完成了脚踝关节和参考ZMP的轨迹规划, 就得到了左右脚踝关节随时间的运动曲线 $(x_{aL}(t), z_{aL}(t))$, $(x_{aR}(t), z_{aR}(t))$, 以及参考ZMP的轨迹曲线

$(x_{zmp}(t), 0)$. 设相应的髋关节轨迹为 $(x(t), z(t))$, 根据几何约束和ZMP最优条件, 可以得到髋关节的运动轨迹必须满足

$$\begin{cases} \min \|f(x, z, x_{aL}, z_{aL}, x_{aR}, z_{aR}) - x_{zmp}\|^2, \\ (x, z) = g(x_{aL}, z_{aL}, x_{aR}, z_{aR}), \\ x_1 \leq x \leq x_2, z_1 \leq z \leq z_2. \end{cases} \quad (6)$$

其中: 函数 f 为给定机器人位姿情况下的ZMP的 x 分量, 函数 g 为机器人必须满足的位姿约束条件.

这是一个泛函极值最优化问题. 首先, 由于最优条件 $f(x, z, x_{aL}, z_{aL}, x_{aR}, z_{aR}) - x_{zmp}$ 的2-范数恒大于零, 所以最优条件存在下确界, 最小值存在; 其次, 根据需要将函数离散化, 设采样点数为 N , 若存在离散函数 $\tilde{x}(n) (n = 1, 2, \dots, N)$ 满足机器人的位姿约束条件, 并且对于任意的 $k, 1 \leq k \leq N$, 都有 $f(\tilde{x}(k)) = \tilde{x}_{zmp}(k)$, 则该离散函数就是使得 $\|f(x, z, x_{aL}, z_{aL}, x_{aR}, z_{aR}) - x_{zmp}\|^2$ 取最小值的解. 最后, 由于人在行走的时候可以通过控制髋关节的位置任意的调整ZMP在支撑域内的位置, 对于机器人也应如此, 即对于每一个采样点, 最小值存在且为零. 设对于每一个采样点, 都存在一收敛数列 $x_k(m), m \in N, \lim_{m \rightarrow \infty} x_k(m) = \hat{x}(k)$ 使得 $\lim_{m \rightarrow \infty} f(x_k(m)) = \tilde{x}_{zmp}(k), m \in N$. 那么所有采样点的收敛数列的极限组成的极限函数 $\hat{x}(n), n = 1, 2, \dots, N$ 就是最优化泛函极值问题的解 $\tilde{x}(n)$. 这样泛函极值最优化问题就被转换成为普通的目标函数最优化问题. 问题可以描述为

$$\begin{cases} f(x_m(t_1)) \rightarrow \tilde{x}_{zmp}(t_1), \\ f(x_p(t_2)) \rightarrow \tilde{x}_{zmp}(t_2), \\ \vdots \\ f(x_q(t_n)) \rightarrow \tilde{x}_{zmp}(t_n), \end{cases} \Rightarrow f(x(t)) \rightarrow x_{zmp}(t). \quad (7)$$

其中: t_1, t_2, \dots, t_n 为采样后的时间点, $x_m(t), x_p(t), \dots, x_q(t)$ 为收敛数列, $\tilde{x}_{zmp}(t_k)$ 为离散后的ZMP参考轨迹.

每一个采样点对应的最优化问题是一个约束条件的非线性最优化问题, 可以采用数值最优迭代方法求解. 具体步骤如下: 首先设定停止条件; 然后根据先验初始条件选取一个迭代初值 \vec{x}_0 , 求出在该初值下的目标值; 如果这个目标值满足设定的停止条件, 则迭代停止, 该可行解就是我们所求的最优解; 如果结果不满足停止条件, 设该点为 \vec{x}_k , 求出该点的梯度向量 \vec{p}_k , 根据步长 λ_k 求得新的迭代向量 $\vec{x}_{k+1} = \vec{x}_k + \lambda_k \vec{p}$; 把新的迭代向量代入目标函数求得目标值, 重复以上步骤. 最终该方法能够收敛于一个满足停止条件的可行解.

在求目标函数值的过程中需要求解ZMP的数值, 在ZMP的计算公式(1, 2)中存在质心点的加速度项, 而规划中没有出现各个关节的二次导数项. 通过

$$\begin{cases} v_{n-\frac{1}{2}} = \frac{x_n - x_{n-1}}{t_{sample}}, \\ a_{n-1} = \frac{v_{n-\frac{1}{2}} - v_{n-\frac{3}{2}}}{t_{sample}}, \end{cases} \quad (8)$$

可以近似地求出前一个时刻的加速度. 假设采样时间足够小, 这样可以用前一个时刻的质点加速度来近似后一个时刻的质点的加速度, 有 $a_n \approx a_{n-1}$.

髋关节轨迹的生成是一个求解非线性最优化问题的过程, 但它不同于一般的最优化问题. 首先, 它无需全局最优解, 满足停止条件的解都可以作为可行解; 其次, 它的解空间有多个可行解, 需要选取离迭代初值最近的那个解作为最优解, 这样能保证运动的连续性, 而按线性搜索方法求解出来的最优解是迭代初值邻域内的极小值, 正好能够满足步态规划连续的要求; 再次, 算法中第 n 次的髋关节迭代求解需要前两次规划的结果, 规划后不会对前面的规划造成影响. 因此可以在任意时刻直接修改下一代周期内的踝关节轨迹和ZMP轨迹, 在线地计算人形机器人髋关节轨迹, 实现机器人的在线步态规划, 无需修改先前已经生成的步态. 使用最优化线性搜索求解步态规划的算法程序流程图如图2所示.

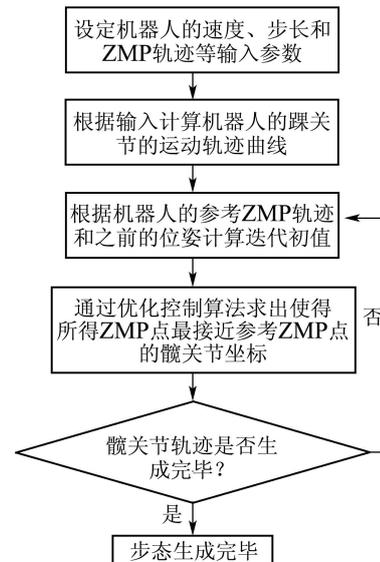


图2 程序流程图

Fig. 2 Program flow chart

4 仿真和实验(Simulation and experiment)

在MATLAB中完成了机器人步态规划的设计, 在自行研制的人形机器人WuKong上进行了实际测试. 仿真中所用到的参数都按照WuKong的尺寸进行设计规划. 其参数如表1所示.

表1 机器人尺寸和质量

Table 1 The dimension and mass of the robot

	长度/cm	质量/kg	质心位置/cm
L1	22.6	2	9.1
L2	10	0.217	3.87
L3	10	0.217	3.87
L4	10	0.216	6.16
L5	10	0.216	6.16
L6	3.82	0.174	1.36
L7	3.82	0.174	1.36

设定人形机器人步长为12 cm, 单脚支撑相时间为1.6 s, 双脚支撑相时间为1.2 s, ZMP移动距离为6 cm, 速度保持匀速. 通过MATLAB规划得到的机器人侧面步态如图3所示.

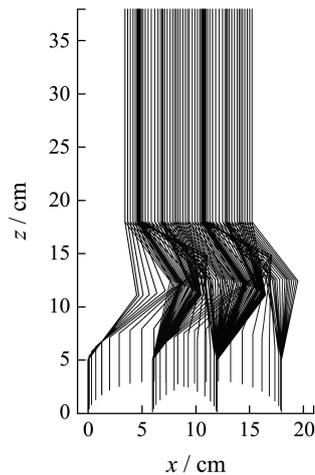


图3 生成的侧面步态规划结果

Fig. 3 Result of the sagittal gait planning result

图4对比了参考ZMP轨迹(用点表示)和所生成的步态的ZMP轨迹(用 x 表示).

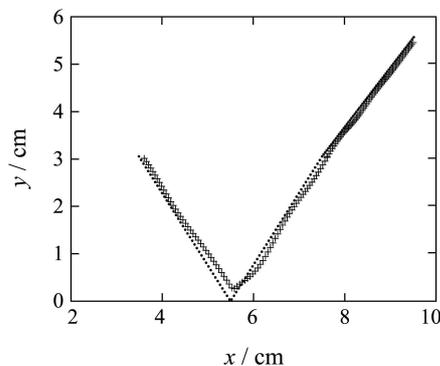


图4 参考ZMP轨迹和实际规划来的ZMP轨迹

Fig. 4 Reference ZMP trajectory and practical ZMP trajectory

从图中可以看出规划得到的ZMP已经非常接近给定的ZMP轨迹, 能够很好的保证机器人的稳定性. 而且随着采样时间的缩小ZMP的偏移也越来越小, 这也说明上述步态规划方法具有很好的收敛特性.

最后在实物机器人WuKong上测试生成的步态. 行走效果如图5所示, 机器人能够在地面上稳定行走.

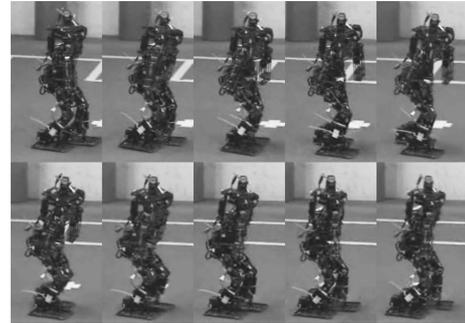


图5 实物机器人WuKong验证步态算法的稳定性

Fig. 5 Using physical robot "WuKong" to verify the stability of the algorithm

5 结论(Conclusion)

本文使用最优化线性搜索算法规划人形机器人的步态. 该方法将最优化泛函极值问题转换为非线性约束条件的最优化极值的问题, 通过规划机器人脚踝关节和参考ZMP的运动得到机器人的步态. 机器人步态可以在线生成. 使用该方法生成的步态能很好的收敛到给定的参考ZMP, 且生成的步态稳定, 在仿真平台和实物上都得到了验证. 采用该控制算法的机器人在2007年Robocup中国公开赛上获得了人形组冠军.

参考文献(References):

- [1] 谢涛, 徐建峰, 张永学, 等. 仿人机器人的研究历史、现状和展望[J]. 机器人, 2002, 24(4): 367-374.
(XIE Tao, XU Jianfeng, ZHANG Yongxue, et al. Research history of humanoid robot[J]. *Robot*, 2002, 24(4): 367-374.)
- [2] VUKOBRATOVIC M, BOROVIAC B. Zero-moment point—thirty five years of its life[J]. *International Journal of Humanoid Robotics*. 2004, 1(1): 157-173.
- [3] ZHOU C J, YUE P K, NI J. Dynamically stable walking and kicking gait planning for humanoid soccer robots[C]//*RoboCup 2004 Symposium*. Lisbon, Portugal: [s.n.], 2004: 367-378.
- [4] CAPI G, NASU Y, BAROLLI L, et al. Real time gait generation for autonomous humanoid robot: A case study for walking[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2003, 42(2): 107-116.
- [5] FURUTA T, TAWARA T, OKUMURA Y, et al. Design and construction of a series of compact humanoid robots and development of biped walk control strategies[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2001, 37(2/3): 81-100.
- [6] 魏航信, 刘明治. 仿人形机器人矢状面跑步运动的实现[J]. 机器人, 2006, 28(1): 5-9.
(WEI Hangxin, LIU Mingzhi. Realization of running for humanoid running robot in sagittal plane[J]. *Robot*, 2006, 28(1): 5-9.)

(下转第676页)

的收敛方式,进而决定了滑模控制系统的运动品质即滑模控制模型的拟合精度。 λ 的不同取值对本模型拟合精度的影响规律将另文阐述。

参考文献(References):

- [1] ZHANG H M, KIM T. A car-following theory for multiphase vehicular traffic flow[J]. *Transportation Research, Part B*, 2005, 39(5): 385 – 399.
- [2] BHAM G H, BENEKOHAL R F. A high fidelity traffic simulation model based on cellular automata & car-following concepts[J]. *Transportation Research, Part C*, 2004, 12(1): 1 – 32.
- [3] AHN S, CASSIDY M J, LAVAL J. Verification of a simplified car-following theory[J]. *Transportation Research, Part B*, 2004, 38(5): 431 – 440.
- [4] BRACKSTONE M, MCDONALD M. Car-following: a historical review[J]. *Transportation Research, Part F*, 1999, 2(4): 181 – 196.
- [5] RUSSELL S, NORVIG P. 人工智能——一种现代方法[M]. 第2版. 北京: 人民邮电出版社, 2004.
(RUSSELL S, NORVIG P. *Artificial Intelligence—A Modern Approach*[M]. 2nd ed. Beijing: Posts and Telecom Press, 2004.)
- [6] JACQUES J, SLOTINE E. Sliding controller for non-linear systems[J]. *International Journal of Control*, 1984, 40(2): 421 – 434.
- [7] 高为炳. 变结构控制理论基础[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1990.
(GAO Weibing. *Variable Structure Control Theory*[M]. Beijing: China Science & Technology Press, 1990.)
- [8] 王立新. 模糊系统与模糊控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
(WANG Lixin. *A Course in Fuzzy Systems and Control*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.)
- [9] 王殿海. 交通流理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
(WANG Dianhai. *Traffic Flow Theory*[M]. Beijing: China Communication Press, 2002.)

作者简介:

吴洋 (1977—), 男, 博士研究生, 研究方向为交通工程, E-mail: wuyang333@yahoo.com.cn;

罗霞 (1962—), 女, 博士, 教授, 研究方向为区域交通规划、智能交通系统、物流供应链管理;

刘昱岗 (1977—), 男, 博士研究生, 研究方向为物流工程。

(上接第664页)

- [7] MU X P, WU Q. Synthesis of a complete sagittal gait cycle for a five link biped[J]. *Robotica*, 2003, 21(5): 581 – 587.
- [8] HUANG Q, YOKOI K, KAJITA S, et al. Planning walking patterns for a biped robot[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2001, 17(3): 280 – 289.
- [9] 胡凌云, 孙增圻. 基于T-S模糊再励学习的稳定双足步态生成算法[J]. 机器人, 2004, 26(5): 461 – 466.
(HU Lingyun, SUN Zengqi. Stable biped gait generation algorithm based on T-S Fuzzy Reinforcement Learning Method[J]. *Robot*, 2004, 26(5): 461 – 466.)

作者简介:

汤卿 (1982—), 男, 博士研究生, 研究领域为仿人形机器人的步态规划和运动控制算法等, E-mail: tangq@iipc.zju.edu.cn;

熊蓉 (1972—), 女, 浙江大学工业控制技术国家重点实验室副教授, 主要研究方向为运动控制、智能环境建模等, E-mail: rxiong@iipc.zju.edu.cn;

褚健 (1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为自动控制理论及应用、自动化仪表及装置。

(上接第670页)

- [7] DORATO P. Non-fragile controllers design: an overview[C]// *Proceedings of the American Control Conference*. Philadelphia, Pennsylvania: IEEE Press, 1998: 2829 – 2831.
- [8] GUAN X, ZHANG Q. Design of resilient guaranteed cost controllers for a class of generalized systems[C]// *Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Shanghai: IEEE Press, 2002: 160 – 164.
- [9] MAHMOUD M S. Resilient linear filtering of uncertain systems[J]. *Automatica*, 2004, 40(10): 1797 – 1802.
- [10] GAO H, XU B, ZHANG Y, et al. A new delay-dependent stability criterion for singular time-delay systems[C]// *Proceedings of*

the 6th IEEE International Conference on Control and Automation. Guangzhou: IEEE Press, 2007: 2252 – 2256.

- [11] PETERSON I R. A stabilization algorithm for a class uncertain linear systems[J]. *Systems & Control Letters*, 1987, 8(4): 351 – 357.

作者简介:

高焕丽 (1977—), 女, 博士研究生, 研究方向为奇异系统、时滞与不确定系统的控制与综合, E-mail: shanggaohl@126.com;

胥布工 (1956—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为时滞与不确定系统的控制与综合、及鲁棒控制等, E-mail: aubgxu@scut.edu.cn;

秦小丽 (1979—), 女, 博士研究生, 研究方向为飞行器控制, E-mail: wrqxl@yahoo.com.cn.