

血管主从介入手术导管机器人三维模糊控制

赵希梅^{1,2}, 游健康¹, 刘浩², 李洪谊²

(1. 沈阳工业大学电气工程学院, 沈阳 110870; 2. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 沈阳 110016)

摘要: 在微创血管介入手术中, 当从端导管机器人输送导管时, 导管易受到患者心跳、呼吸等不确定因素的影响。为了能抑制这些因素对输送导管造成的影响, 实现导管机器人系统从手端精确快速地跟踪主手端的控制指令, 建立了导管远端弯曲段的运动学模型, 设计了基于三维模糊控制器的导管机器人系统。三维模糊控制器是在二维模糊控制器的基础上引入了导管位置误差变化的速率的作用, 能进一步提高系统响应速度、降低超调、抑制干扰。仿真结果表明, 此控制方案使导管机器人系统具有快速的跟踪性能和较强的鲁棒性能, 进而提高了系统的控制精度。

关键词: 主从介入手术; 导管机器人系统; 三维模糊控制; 导管运动学模型

中图分类号: TP273.4 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2015) 05-0997-06

DOI:10.16182/j.cnki.joss.2015.05.011

Three-dimensional Fuzzy Control of Catheter Robotic in Endovascular Master-slave Interventional Surgery

Zhao Ximei^{1,2}, You Jiankang¹, Liu Hao², Li Hongyi²

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: In minimally invasive endovascular interventional surgery, catheter was vulnerable to be interfered by uncertain factors such as heartbeat and breathing of patients during catheter robot of slave side conveyed catheter. In order to retrain impact on catheter transport of these factors and realize that slave side of catheter robot system tracked control command of master side accurately and quickly, kinematic model of catheter distal bending section was established, and catheter robot system based on three-dimensional fuzzy controller was designed. Three-dimensional fuzzy controller that introduced the function of rate of error change on the basis of two-dimensional fuzzy controller could further improve response speed of system and reduce overshoot and retrain disturbance. Simulation results show that the scheme makes catheter robot system have fast tracking performance and stronger robustness performance, improving control precision of system.

Keywords: master-slave interventional surgery; catheter robot system; three-dimensional fuzzy control; catheter kinematic model

引言

血管介入手术具有伤口小、出血少、术后恢复



收稿日期: 2014-04-02 修回日期: 2014-06-06;
基金项目: 国家自然科学基金(61105099);
作者简介: 赵希梅(1979-), 女, 吉林德惠人, 博士后, 副教授, 硕导, 研究方向为直线伺服、数控技术、机器人控制等; 游健康(1989-), 男, 河南信阳人, 硕士, 研究方向为机器人控制、智能控制等。

快且并发症少等优点, 因此广泛应用于心脑血管的治疗中。在传统的微创血管介入手术中, 医生长时间在辐射环境中进行手术, 这会对他们造成伤害。机器人系统与人相比具有很多优势。以手术机器人系统代替医生操作导管, 辅助医生进行手术, 可以实现远程操控, 医生通过操作机器人系统间接操作导管到达病灶处, 这样医生可以远离手术现场, 减

少射线辐射对他们造成的损伤。

在这一领域内,已有一些研究成果出现。国外,加拿大的 Ganji 等人搭建了一个心脏内导管自动导航控制平台,实现了在心脏内导航导管到达目标位置,机器人导管系统控制采用的是比例控制^[1-2];韩国的 Park 等人开发了一套力反馈的机器人导管平台,导管机器人的运动控制与力控制均采用 PID 控制方法^[3];美国的 Penning 等人提出了导管系统的开环控制和闭环积分控制方案,提高了导管跟踪指令的性能和抗扰动能力^[4];郭书祥等人研制了一种新型的主从机器人导管操纵系统,对主从手系统进行了 PID 控制和模糊 PID 控制的研究,使从手更好地跟随主手的指令^[5]。在国内,北京航空航天大学、哈尔滨工业大学等单位也做了相关的研究^[6-8]。

总的来说,现有的研究中导管机器人系统的控制方法通常为 PID 控制方法。然而,导管是一个高度柔性的设备,难以给出精确的运动学模型,而且导管在病人血管内运动,受到血液流速、血管接触力以及体内干扰等不确定性因素的影响,系统参数会发生相应变化,导致机器人的操作指令与导管远端的运动没有确定的对应关系。PID 控制器的参数选定后就固定不变,这样它对该种系统的适应性较差^[9]。因此,需要寻找更有效的方法来提高导管操作机器人系统的控制性能,使医生对导管的操作更加精确、灵活。由于模糊控制不需要知道被控对象的精确的数学模型,对过程参数变化不敏感,应用于非线性系统时具有很强的鲁棒性和良好的控制品质,很适合该系统的控制需要。然而,二维模糊控制方法由于其自身的特点,它在消除系统稳态误差方面的性能相对较差,且在快速性和稳定性之间存在矛盾。通常情况下增加模糊控制器的维数,控制就越精细,模糊控制器的控制精度就越高,因此,本文采用三维模糊控制器,在以误差、误差变化率的二维模糊控制量的基础上,引入误差变化的变化率的作用作为模糊控制器的第三维输入,这样既能提高机器人操作导管的精度和系统的响应速度,又能降低扰动等不确定因素对导管运动的影响,减少了系统超调,使手术更加精确、安全。

1 介入系统及导管模型

1.1 介入系统

在微创血管介入手术中,医生远离手术现场,在医学图像的引导下,通过主手给出控制指令,经过上位机处理,发送到从端运动控制卡中,控制导管机器人运动,进而操作导管运动;同时,位姿传感器能够获得导管远端的实时位姿信息并传递到上位机中。导管机器人介入系统的组成如图 1 所示。该系统采用主从控制方式,这样可以避免医生遭受射线辐射,充分利用上位机在图像处理和人机交互方面的优势,以及运动控制卡在运动控制方面的优势。导管远端在血管内运动,当遇到血管分支结构时,远端旋转或弯曲进入分支结构。因此,导管在血管内有轴向进退、旋转和远端弯曲这三种运动方式,导管机器人结构图如图 2 所示。医生操作机器人控制导管近端,使其远端运动到预定的位置处,实现对病人病灶处的治疗。

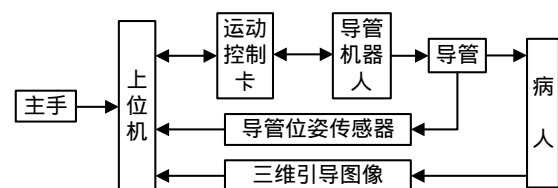


图 1 导管机器人介入系统

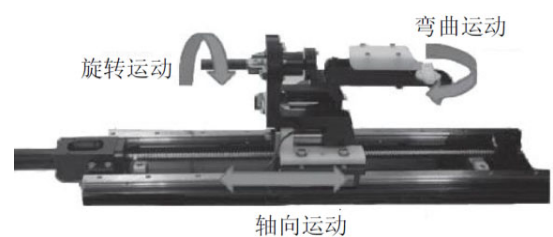


图 2 导管机器人

1.2 导管运动学分析

导管机器人代替医生操作导管近端,完成导管远端运动。因此,实现对导管末端位置的精确控制,需要分析导管近端操作与导管末端运动之间的传递关系,即导管的运动学模型。这里把导管远端当成一个连续机械手,并用刚性的连杆机构表示,同

时,认为导管弯曲段为圆弧,且导管在弯曲变形过程中没有扭矩产生^[2]。这样,可获得导管远端弯曲段简化的运动学模型,如图 3 所示。

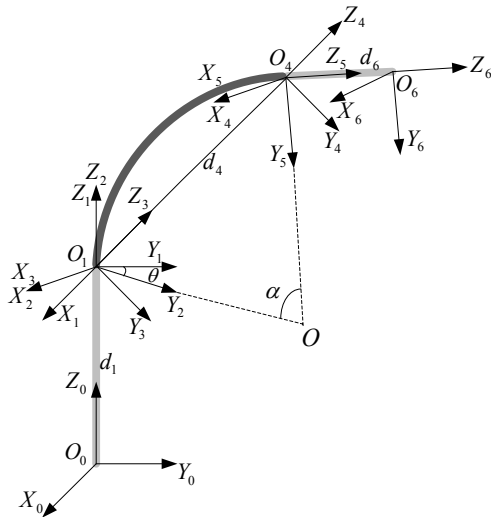


图 3 导管远端运动学模型

根据 D-H 法则可获得导管远端基坐标系 $\{O_0\}$ 到末端坐标系 $\{O_6\}$ 之间的齐次变换矩阵^[9],计算可得到如式(1)所示矩阵。式中的 s 和 c 分别表示 \sin 和 \cos 。

$${}^0_6T = \begin{bmatrix} c\theta & s\theta c\alpha & s\theta s\alpha \\ -s\theta & c\theta c\alpha & c\theta s\alpha \\ 0 & -s\alpha & c\alpha \\ 0 & 0 & 0 \\ d_6 s\theta s\alpha + d_4 s\theta s(\alpha/2) \\ d_6 c\theta s\alpha + d_4 c\theta s(\alpha/2) \\ d_6 c\alpha + d_4 c(\alpha/2) + d_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

根据式(1),得到导管末端坐标原点 $[x \ y \ z]^T$ 在基坐标系中的坐标,如式(2)所示。

$$[x \ y \ z]^T = \begin{bmatrix} d_6 \sin \theta \sin \alpha + d_4 \sin \theta \sin(\alpha/2) \\ d_6 \cos \theta \cos \alpha + d_4 \cos \theta \cos(\alpha/2) \\ d_1 + d_6 \cos \alpha + d_4 \cos(\alpha/2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: d_4 与 α 是耦合的; d_6 是导管末端刚性部分的长度为常量。导管弯曲段为圆弧且认为弯曲段的长度在弯曲过程中是不变的,设其长度为 L 。这样可以得到 d_4 与 α 之间的关系式:

$$d_4 = \frac{2L \sin(\alpha/2)}{\alpha} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)中,导管末端位置矢量的参数变量减少到 3 个。导管的轴向进退运动改变 d_1 的大小,导管的旋转运动改变 θ 的大小,导管的远端弯曲改变 α 的大小。导管机器人操作导管近端控制这 3 个变量,进而控制导管的末端位置,使导管末端向病灶处运动。医生的目标是控制导管末端位置,因此,需要运用逆运动学,将导管的位置偏差量变换成导管的关节偏差量,导管机器人控制这些关节量,使导管末端运动到目标位置处。逆运动学控制方法需要用到雅克比矩阵。式(2)中的位置量对关节变量求微分,即可获得一个三阶的雅克比矩阵^[2],在奇异点外对它求逆,可以得到雅克比逆矩阵(J^{-1}),应用于导管的末端位置控制。导管末端位置误差与关节变量之间的关系为:

$$\begin{bmatrix} \delta d_1 \\ \delta \theta \\ \delta \alpha \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (4)$$

通过上式,就将位置误差变为关节量的偏差,控制这 3 个关节变量,就可以控制导管末端的位置。

2 导管机器人系统三维模糊控制

导管在血管内运动时受到患者心跳、呼吸、血管壁摩擦等扰动作用的影响,这些干扰传递到导管近端,会对操作导管近端的机器人产生影响,增加了被控对象的不确定性。因此,需要在导管输送过程中,不断改变控制参数,降低这些扰动对导管输送的影响,提高系统输送导管的精度。传统的 PID 控制参数选定后不能改变,应用于该系统时不能获得很好的控制效果。模糊控制不依赖被控对象的精确模型,能够满足导管机器人系统控制的需要。三维模糊控制能有效地解决传统二维模糊控制器快

速响应与稳定性之间的矛盾，具有优良的控制性能。因此，在二维模糊控制器的基础上引入误差变化的速率的作用，以提高导管机器人系统的控制精度，减小超调，提高导管输送的安全性，实现对导管机器人的有效控制。

2.1 三维模糊控制器的设计

应用于导管机器人系统的三维模糊控制器的基本结构如图 4 所示。它的 3 个输入量分别是导管末端位置误差、位置误差的变化、位置误差变化的变化，模糊化后分别为 E 、 EC 和 ECC ，集合论域均为 $\{-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ ，语言变量的子集选为 $\{NB, NS, ZE, PS, PB\}$ ，分别表示负大、负小、0、正小、正大，它们的隶属度函数均为三角形，模糊子集的隶属函数在论域上的分布如图 5 所示。

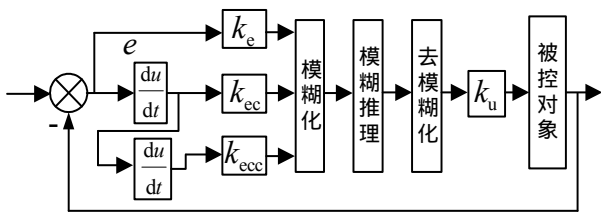


图 4 三维模糊控制器的基本结构

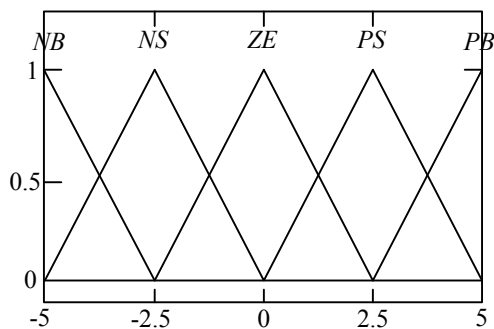


图 5 各个变量的模糊子集分布

模糊控制方法的核心是模糊规则的设计，是控制器设计的关键，模糊推理部分是根据这些模糊规则计算出模糊控制量^[10]。导管在血管内运动，受到干扰时，为了手术的安全性，控制器需要及时地做出判断改变输出量，控制机器人及时改变导管的运动方式，降低扰动对导管运动的影响。根据模糊

控制理论和控制系统的要求可得出模糊控制规则。由于三维模糊器的控制规则比较复杂，因此，为了更加直观、方便，用分页表格的办法来描述模糊控制规则，如模糊语言变量 ECC 有 NB, NS, ZE, PS 和 PB 这 5 种状态，则它的每一种状态可用一个表格描述。总共可得到 5 个控制规则表。表 1 和表 2 分别是 ECC 为 NB 和 PS 时的控制规则表，其它 3 个控制规则表与之相似。

表 1 ECC 为 NB 时的规则表

EC	E				
	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	NS
NS	NB	NB	NS	NS	ZE
ZE	NB	NS	NS	ZE	ZE
PS	NS	NS	ZE	ZE	PS
PB	NS	ZE	ZE	NS	PS

表 2 ECC 为 PS 时的规则表

EC	E				
	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NS	ZE	ZE	ZE
NS	NS	ZE	ZE	ZE	PS
ZE	ZE	ZE	ZE	PS	PS
PS	ZE	ZE	PS	PS	PB
PB	ZE	PS	PS	PB	PB

这些控制规则表构成了三维模糊控制器的全部控制规则。它们给出了当 ECC 为 5 种不同状态时， E 和 EC 可能出现的状态及相应的模糊控制方案。控制规则总共有 125 条，各条规则之间是“或”的关系。

确定模糊推理规则后，控制器的推理模型为 Mamdani，模糊蕴涵(Implication)关系选为 \min ，模糊的合成(Aggregation)选为 \max 。经过模糊推理后，需要将模糊量变为精确的控制量来，即模糊量的去模糊化。这里采用重心法来去模糊化。控制器输出的精确量乘以相应的比例因子后控制导管机器人。

2.2 导管机器人三维模糊控制

当操作导管时，医生远离手术室，在三维引导图像的辅助下，控制主手给出导管末端期望的目标

位置信号。在上位机中,系统计算期望目标位置与位姿传感器测得的导管实际位置之间的偏差,通过与逆雅克比矩阵相乘,把导管的位置误差转变成导管的 3 个关节偏差量,并将这些信息实时发送到从端控制卡中。在从端,三维模糊控制器根据输入偏差的情况进行推理计算,输出合适的控制量,经相应的变换后,作为导管机器人的控制指令,进而控制导管机器人操作导管使导管末端到达期望位置,基于三维模糊控制的导管机器人系统框图如图 6 所示。

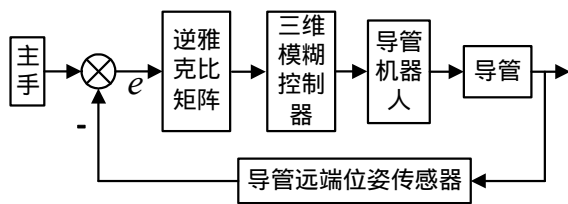


图 6 导管机器人系统三维模糊控制

3 系统仿真分析

为了验证所提出的控制方法的有效性,对微创血管介入手术导管机器人系统分别采用 PID 控制、二维模糊控制和三维模糊控制进行仿真对比实验,验证三维模糊控制方法的优越性能。在导管机器人系统中,机器人对导管的 3 个关节变量的控制是相互独立的,在式(4)中,雅克比逆矩阵可看为常量,由此可看出理论上,导管 3 个关节变量的变化是相互独立的,改变一个关节量的大小不会影响其它 2 个关节量;即使导管机器人同时操作导管的 3 个关节变量时,它们之间也不会相互影响。而且机器人对导管的 3 个自由度的操作方式是相同的,只是不同的运动是由机器人相应的机构完成。因此,为了简化仿真分析,可以选择导管的轴向运动进行仿真实验。在导管的轴向运动仿真中,PID 控制器参数选取为: $k_p=8$, $k_i=12$, $k_d=0.9$;二维模糊控制器的量化因子分别选取为 6 和 0.7,比例因子选取为 9;三维模糊控制器的量化因子分别选取为 10,0.1 和 0.005,比例因子选取为 6.5。

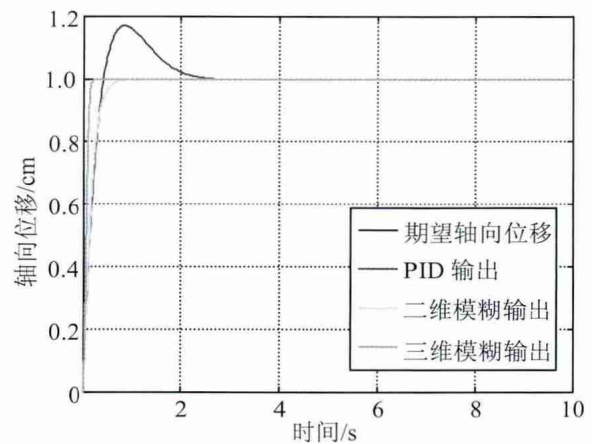


图 7 输入为阶跃位移信号时系统的跟踪曲线

在手术过程中,导管的全部运动路径可分为很多段,操作者不断地通过主手给出导管的下一个期望目标位置,最终将导管末端送到病灶处。因此,可以用阶跃位移信号来表示导管机器人操作导管的动作。在给定输入信号是幅值为 1 cm 的导管轴向位移的情况下,基于 PID 控制的导管机器人系统、基于二维模糊控制的导管机器人系统和基于三维模糊控制的导管机器人系统跟踪曲线如图 7 所示。图 8 是各个控制系统对阶梯型轴向位移信号的跟踪曲线。阶梯型信号表示导管机器人操作导管连续进给动作和连续撤回动作。从图 7 和图 8 中的仿真结果可以看出,基于 PID 控制的导管机器人系统跟踪主手位移时,响应慢,超调量大,进入稳态时间长,跟踪精度差;基于三维模糊控制器的导管机器人系统比其它两种控制系统响应快,且无超调,控制精度高。

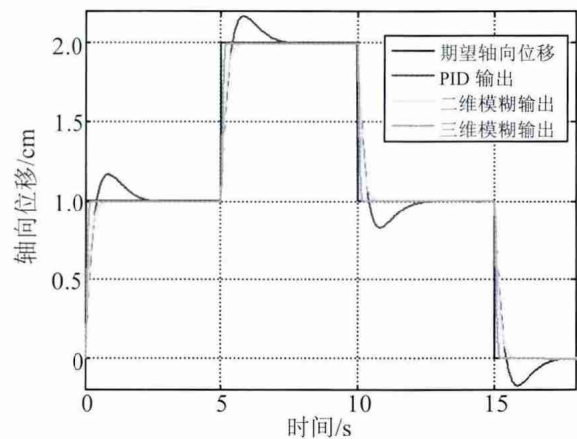


图 8 输入为阶梯型位移信号时系统的跟踪曲线

为了对比 3 种导管机器人控制系统的对抗动的抑制能力,在 5 s 时刻加入幅值为 1 mm 的阶跃轴向位移扰动信号,仿真结果如图 9 所示。为了便于清晰,对图中扰动部分进行了局部放大。从图 9 的仿真结果中可以看出,相对于另外两种控制系统,三维模糊控制系统在受到扰动影响后能够快速回到稳定状态,过渡时间短,抑制扰动能力强,具有较强的鲁棒性。上述仿真结果表明,三维模糊控制方法的控制性能优良,应用于导管机器人系统控制精度高。

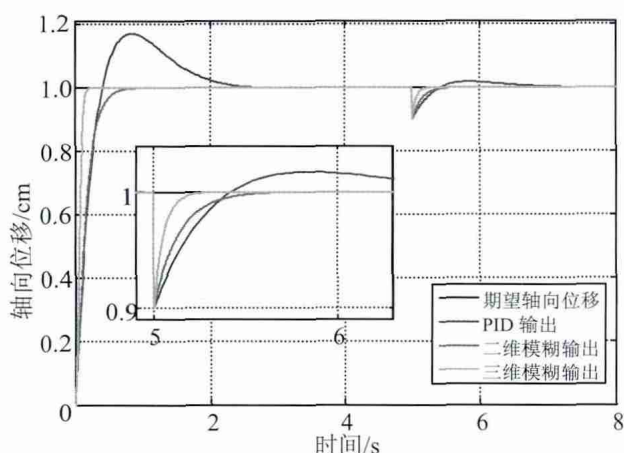


图 9 系统在阶跃扰动下的轴向位移跟踪曲线

4 结论

在导管机器人系统中,不确定性因素影响导管在血管内的运动,为了提高导管机器人系统的控制精度,减少导管操作过程中的超调,增加手术的安全性,将三维模糊控制方法应用于导管机器人系统。仿真实验结果表明,采用三维模糊控制,导管机器人系统具有响应速度快、无超调,鲁棒性强的优点,进而大大提高了系统的控制精度,使手术更加安全。由于三维模糊控制器控制品质优于二维模糊控制器和 PID 控制器,具有优良的控制性能,所以它很适合机器人导管系统的控制。在接下来的

研究中,将在实际导管机器人系统中,通过导管的介入实验来进一步评估该控制方案的控制品质。

参考文献:

- [1] Ganji Y, Janabi-Sharifi F, Cheema AN, *et al.* Robot-assisted catheter manipulation for intracardiac navigation [J]. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery (S1861-6410), 2009, 4(4): 307-315.
- [2] Ganji Y, Janabi-Sharifi F. Catheter Kinematics for Intracardiac Navigation [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering (S0018-9294), 2009, 56(3): 621-632.
- [3] Park J W, Choi J, Park HN, *et al.* Development of a Force-Reflecting Robotic Platform for Cardiac Catheter Navigation [J]. Artificial Organs (S1525-1594), 2010, 34(11): 1034-1039.
- [4] Penning RS, Jung J, Ferrier NJ, *et al.* An Evaluation of Closed-Loop Control Options for Continuum Manipulators [C]// 2012 International Conference on Robotics and Automation, Saint Paul, USA: IEEE, 2012: 5392-5397.
- [5] Ma Su, Guo Shuxiang, Xiao Nian, *et al.* Development of a Novel Robotic Catheter Manipulating System with Fuzzy PID Control [J]. International Journal of Intelligent Mechatronics and Robotics (S2156-1664), 2012, 2(2): 58-77.
- [6] 赵德朋, 刘达. 血管介入手术机器人系统力反馈的模糊融合[J]. 机器人, 2013, 35(1): 60-66.
- [7] 付宜利, 高安住, 刘浩, 等. 导管机器人系统主从介入[J]. 机器人, 2011, 33(5): 579-584.
- [8] 赵希梅, 游健康, 刘浩, 等. 微创血管介入手术导管辅助机器人自整定模糊PID控制[J]. 中国生物医学工程学报, 2014, 33(1): 123-127.
- [9] 陈小强, 马泳娟, 侯涛, 等. 预测模糊PID在高速列车速度控制中的研究[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(1): 191-196, 201.
- [10] 李学军, 周元, 宾光富, 等. 基于三维模糊PID控制策略的水泥分解炉温度控制系统研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(10): 37-41.