

新型模糊PID控制及在HVAC系统的应用

吕红丽¹, 段培永¹, 崔玉珍¹, 贾磊²

(1. 山东建筑大学 信息与电气工程学院, 山东 济南 250101; 2. 山东大学 控制科学与工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 为了推广模糊控制器在非线性系统中的应用, 提出一种利用PID控制器的参数优化和调节模糊控制器的新型设计方法. 通过模糊控制器的结构分析建立与PID控制之间的精确解析关系之后提出基于PID控制增益因子的模糊控制器设计算法, 然后利用改进的变论域思想进一步优化模糊控制器设计参数. 将其应用于暖通空调(HVAC)系统的节能控制中并与常规PID控制器相比较, 仿真和实验结果表明这种模糊控制器具有超调量小、跟踪迅速、鲁棒性强等优越的控制性能.

关键词: 模糊控制; PID控制; 结构分析; 变论域; 暖通空调系统

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Novel fuzzy PID control and application to HVAC systems

LÜ Hong-li¹, DUAN Pei-yong¹, CUI Yu-zhen¹, JIA Lei²

(1. Information and Electrical Engineering College, Shandong Jianzhu University, Jinan Shandong 250101, China;
2. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan Shandong 250061, China)

Abstract: In order to extend the application of fuzzy controller to nonlinear systems, a new fuzzy control strategy converted directly from the PID controller is proposed. The mathematical relation between the parameters of the fuzzy controller and the linear gain of the conventional PID controller is derived based on the structure analysis of fuzzy controller. Based on this mathematical relation, the fuzzy controller is designed through the gain-tuning in the PID controller. Furthermore, the improved variable universe method is employed to optimize the parameter tuning of the fuzzy controller on line. This new fuzzy controller is also applied to energy-saving control in heating, ventilating, and air-conditioning(HVAC) systems. The comparison of the simulation results between this fuzzy controller and the conventional PID controller shows that this fuzzy controller is effective and the algorithm provides less overshoot, shorter setting time and better robustness, etc.

Key words: fuzzy control; PID control; structure analysis; variable universe; HVAC systems

1 引言(Introduction)

自1974年Mamdani将模糊控制首次应用到蒸汽机车的控制以来^[1], 基于Zadeh提出的模糊逻辑技术发展起来的模糊控制已经被成功应用到各种过程控制领域^[2]. 模糊控制能够充分利用专家知识和操作经验而无需建立系统的精确数学模型, 但模糊控制器仍无法在现实工业过程中大范围的进行推广和应用, 主要原因之一是现场操作人员难以理解和掌握模糊控制技术, 从而阻碍了模糊控制的应用. 目前工业过程中大部分控制问题所面临的是高度非线性、时变、含有扰动等不确定性因素的复杂非线性系统^[3], 给过程控制研究带来巨大的困难和挑战. 常规PID控制器仍然被广泛应用, 但是由于实际被控过程的复杂性往往很难获得满意的控制效果^[4]. 尽管

很多先进的控制技术已经被用来调节和改进PID控制器的设计^[5,6], 但是这些并不能改变PID控制器本质上的线性特征. 本文将模糊调节PID控制策略进行逆向思维, 尝试探索模糊控制器与PID控制器的一种新型的组设计形式, 利用成熟的PID控制器增益因子对模糊控制器的参数进行设计和调节, 提出了一种基于PID控制器增益因子的模糊控制器新型设计方法. 这样既充分利用PID控制器的成熟技术, 同时又发挥了模糊控制器的全局非线性优势, 提高控制系统的鲁棒性, 还使得模糊控制技术便于普通技术人员的学习和掌握.

2 模糊控制器的结构和参数设计(Structure and parameters design of fuzzy controller)

考虑一个通常的闭环反馈控制系统, 其中 r , u 和

y 分别表示系统的参考输出、控制律和系统输出. 首先经过分析和比较确定采用输入变量均为 $e, \Delta e$, 输出变量分别为直接输出 u 和增量输出 Δu 的2维模糊控制器的并联组合, 即采用模糊PD控制器 $u_{PD} = F_1(e, \Delta e)$, 和模糊PI控制器 $\Delta u_{PI} = F_2(e, \Delta e)$. 模糊控制器的参数可通过设计参数和调节参数两部分进行系统辨识. 首先把模糊控制器的各项设计参数选定, 同时所有变量均采用基本论域为 $[-1, 1]$, 并且把在 $[-1, 1]$ 上完成设计参数的模糊控制器称为通用模糊控制器. 然后再根据被控制过程的实际情况设计正规化因子即可完成整个模糊控制器的设计过程.

2.1 通用模糊控制器的设计(Design of nominal fuzzy controllers)

考虑模糊PD控制器 $F_1(e, \Delta e)$, 在任意给定的采样时刻 $n, e(n), \Delta e(n)$ 作为控制器的输入变量, $u(n)$ 作为控制器的输出, 模糊控制器结构参数具体设计如下:

$e(n), \Delta e(n)$ 首先通过正规化因子 $Ge_1, G\Delta e_1$ 进行正规化变换转换到基本论域上, $u(n)$ 的正规化因子为 Gu , 即

$$\begin{cases} e^* = Ge_1 \cdot e(n), \Delta e^* = G\Delta e_1 \cdot \Delta e(n), \\ u(n) = Gu \cdot u^*. \end{cases} \quad (1)$$

这里 $i = 1, 2$ 且 $e^*, \Delta e^*, u^*, \Delta u^* \in [-1, 1]$.

两个输入变量 $e^*, \Delta e^*$ 的隶属函数如图1所示, 每一个变量存在两个模糊集合, 分别记作 $Pe^*, Ne^*, P\Delta e^*, N\Delta e^*$, 输出变量的模糊集合 u^* 采用模糊单点集, 本文考虑 $e, \Delta e, u \in [-1, 1]$, 并且采用线性模糊规则, 模糊and运算选用算术积product; 模糊or运算选用有界和算子sum; 模糊蕴涵运算选择取小算子min; 解模糊算法选择加权平均法.

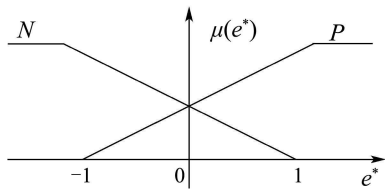


图1 输入变量 e^* 的隶属函数

Fig. 1 The membership function of input e^*

2.2 通用模糊控制器的结构分析(Structure analysis of nominal fuzzy controllers)

为了基于PID控制器参数设计模糊控制器, 首先必须通过模糊控制器的结构分析获得两者之间的解析关系, 继续考虑模糊PD控制器 $F_1(e, \Delta e)$, 在采样时刻 $n, e(n), \Delta e(n)$ 进入模糊控制系统, 经过模糊推理过程、解模糊以及反正规化变换得到局部输出结

果:

$$\begin{aligned} u_1 &= Gu \cdot u^* = \\ &Gu(e^* + \Delta e^*)/2 = \\ &Gu(Ge_1 \cdot e(n) + G\Delta e_1 \cdot \Delta e(n))/2. \end{aligned} \quad (2)$$

对于平行结构的增量模糊控制器 $F_2(e, \Delta e)$, 选择与 F_1 相同设计参数的通用模糊控制器, 只是其输出变量是 Δu^* , 正规化因子为 $Ge_2, G\Delta e_2, G\Delta u$, 经过结构分析得到其局部模糊控制器输出为

$$\begin{aligned} \Delta u_2 &= G\Delta u \cdot \Delta u^* = \\ &G\Delta u(e^* + \Delta e^*)/2 = \\ &G\Delta u(Ge_2 \cdot e(n) + G\Delta e_2 \cdot \Delta e(n))/2. \end{aligned} \quad (3)$$

2.3 模糊控制器与常规PID控制参数的解析关系(Analytical relation between fuzzy and PID controllers)

基于以上的模糊控制器的结构解析分析考虑常规PID控制器与模糊控制器的参数之间的解析关系并选取

$$Ge_1 = Ge_2 = Ge, G\Delta e_1 = G\Delta e_2 = G\Delta e. \quad (4)$$

于是全局模糊控制器的输出为

$$\begin{aligned} u_{fuzzy}(n) &= u_1 + \sum_{i=0}^n \Delta u_2 = \\ &\frac{Gu}{2}(Ge \cdot e(n) + G\Delta e \cdot \Delta e(n)) + \\ &\sum_{i=0}^n \frac{G\Delta u}{2}(Ge \cdot e(\eta) + G\Delta e \cdot \Delta e(\eta)) = \\ &\frac{1}{2}[(Gu \cdot Ge + G\Delta u \cdot G\Delta e) \cdot e(n) + \\ &Gu \cdot G\Delta e \cdot \Delta e(n) + G\Delta u \cdot Ge \cdot \sum_{i=0}^n e(\eta)]. \end{aligned} \quad (5)$$

为了与常规PID控制器相对应, 选择

$$\begin{cases} K_P = (Gu \cdot Ge + G\Delta u \cdot G\Delta e)/2, \\ K_I = G\Delta u \cdot Ge/2, \\ K_D = Gu \cdot G\Delta e/2. \end{cases} \quad (6)$$

于是

$$u_{fuzzy}(n) = K_P \cdot e(n) + K_I \sum_{i=1}^n e(i) + K_D \cdot \Delta e(n). \quad (7)$$

模糊控制律(7)在 n 采样时刻形式上完全成为一种常规PID控制器, 但是随着时间的变化 K_P, K_I, K_D 3个增益系数也随之不断变化, 实现了一组特殊PID控制器之间的软切换. 因此如果假设同一个被控系统常规PID控制器的增益系数 K_P, K_I, K_D 是已知常数, 并与所设计的模糊控制器在 n 采样时刻对应相等, 把

误差变量的正规化因子 Ge 选取为自由变量, 于是方程(7)可转化为

$$\begin{cases} G\Delta e = (K_P \pm \sqrt{K_P^2 - 4K_I K_D}) \cdot Ge / 2K_I, \\ Gu = 4K_D K_I / (K_P \pm \sqrt{K_P^2 - 4K_I K_D}) Ge, \\ G\Delta u = K_I / Ge. \end{cases} \quad (8)$$

可见模糊控制器和常规PID控制器之间存在着精确的解析关系, 于是模糊控制器与常规PID控制器可以根据已知参数通过方程(8)而直接相互转化. 本文将通过以上的解析关系式来设计模糊控制器的正规化因子.

3 基于PID控制参数的模糊控制器新型设计(Novel design of fuzzy controllers based-on PID parameters)

3.1 基于常规PID控制器参数设计模糊控制器(Novel design of fuzzy controllers based-on conventional PID parameters)

首先设计出系统的常规PID控制器, 获得其比例、积分、微分因子. 假设模糊控制器中的误差变量的初始正规化因子 Ge^0 保持不变, 于是初步确定误差变化率和输出变量的正规化因子. 然后通过进一步分析调节PID控制器的增益系数来间接调节模糊控制器的设计参数. 当PID控制器中的比例因子 K_P 增加时, 输出响应加速, 而稳态误差也会降低, 但是当 K_P 太大时会引起震荡或者不稳定. 此时, 根据解析关系(8), 对应的 $G\Delta e$ 的值随着 K_P 增加而增加, Gu 随着 K_P 增加而减小, 代替了简单的比例因子 K_P 的单一变化. 同理, 当PID控制器中的积分因子 K_I 增加时, $G\Delta e$ 随着积分因子 K_I 增加而减小, 而 Gu 和 $G\Delta u$ 的增加反应了两个局部并行模糊控制器各自规则输出的变化; 当PID控制器中的微分因子 K_D 增加时, 降低稳态误差同时加速系统响应, $G\Delta e$ 随着微分因子 K_D 增加而减小, Gu 增加而 $G\Delta u$ 保持不变.

3.2 基于改进的变论域思想的模糊控制器参数优化(Parameter optimization of fuzzy controllers based-on improved variable universe)

模糊控制器的积分环节有时候在平衡点附近会产生一些细微的连续震荡, 消除震荡的一种改进算法是采用李洪兴提出的模糊变论域思想. 改变论域本质是改变变量的正规化因子, 因此如果通用模糊控制器的论域保持不变, 那么通过增加模糊控制器输入变量的正规化因子的取值同样达到了缩小论域的目的, 从而优化了模糊控制器的规则. 将以上设计得到的模糊控制器正规化因子分别记作 $G\Delta e^0$, Gu^0 , $G\Delta u^0$, 当误差变得很小时继续缩小论域来优化控制性能, 于是适当的放大输出误差正

规化因子 Ge , 对模糊控制器参数在平衡点附近进行细微的调节, 完成模糊控制系统的参数在线优化, 实现在误差较小时的高精度模糊控制, 从而进一步提高模糊控制系统性能.

4 仿真结果(Simulation results)

为了验证模糊控制器新型设计算法的有效性, 在MATLAB环境下进行仿真实验. 考虑1阶加滞后过程

$$G(s) = \frac{-0.3e^{-0.8s}}{0.9s + 1}. \quad (9)$$

首先设计出常规PID控制器:

$$u(n) = -1.875 \cdot e(n) - 2.08 \cdot \sum_0^n e(\eta) + 0.09 \Delta e(n).$$

然后选取适合于被控对象的参数和算法设计出通用模糊控制器, 采用第3节的设计选定初始正规化误差因子 $Ge^0 = 1$, 模糊控制器的调节参数为

$$G\Delta e = 0.45, \quad Gu = 0.08, \quad G\Delta u = 2.08.$$

最后将以上设计的模糊控制器作用于系统(9), 基于变论域思想在线调节模糊控制器的各个正规化因子. 将设计好的模糊控制器和原来的常规PID控制器分别作用于控制系统(9), 可以看到它们的控制输出响应几乎是相同的, 如图2所示, 这说明针对被控对象保持不变的系统, 设计的模糊控制器具有常规PID控制器同样的控制性能.

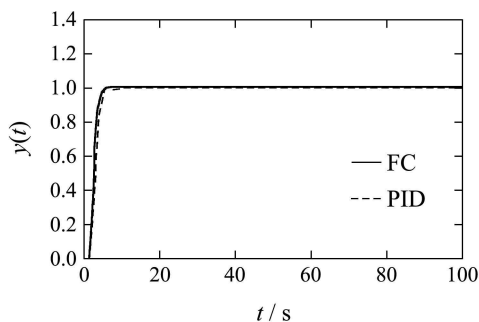


图 2 被控过程(9)的系统响应曲线

Fig. 2 Control response of process(9)

5 模糊控制在暖通空调中的应用研究(Apply fuzzy controllers into HVAC systems)

针对暖通空调系统的空气处理机组设计控制器, 其结构如图3所示^[8]. 系统中存在冷冻水和空气两个物理回路, 强迫对流的热交换过程非常复杂, 很难对多个变量进行直接检测和控制. 为了便于获得PID控制器的参数和实现模糊控制器设计, 把经过热交换后进入房间之前的空气温度, 回风机的干球温度 T_{ao} 作为空调处理机组的输出变量, 而冷冻水的

流速 $\dot{m}_{\text{chw}}$ 是可操作变量,假设进入蒸发器的冷冻水温度 T_{chwi} 是常数,水流速 $\dot{m}_a$ 是根据空调房间的冷冻负载需求变化的.因此,系统输出 T_{ao} 可以描述为

$$T_{\text{ao}} = f(\dot{m}_{\text{chw}}, \dot{m}_a, T_{\text{ai}}, T_{\text{chwi}}), \quad (10)$$

其中 f 表示系统的非线性时变函数,在稳定状态下以及很小的区间上可采用下面的模型进行较准确的估计:

$$\frac{T_{\text{ao}}(s)}{\dot{m}_{\text{chw}}(s)} = \frac{K_{\text{chw}} e^{-L_{\text{chw}} s}}{1 + T_{\text{chw}} s}. \quad (11)$$

这里: K_{chw} , T_{chw} , L_{chw} 分别是冷冻水的过程增益、时间常数、时间滞后,它们是随着空气和水的流速变化的.首先通过仿真研究验证这种新型模糊控制器设计的有效性.考虑方程(11)所描述的热交换过程,在不同的操作区域内进行高、中、低3种不同工况下的控制.首先设计第1种工况下的PID控制器,得到增益系数 K_P , K_I , K_D 分别为1.1, 1.22和0.09,基于这3个参数设计出相应的模糊控制器,然后分别作用于对3种工况下的系统,得到图4的PID控制和模糊控制结果.

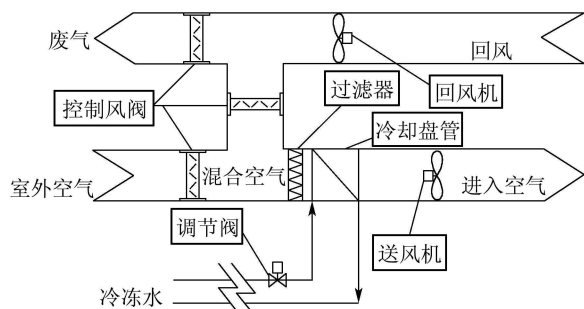


图3 空气处理机组的结构图

Fig. 3 Structure of air handling unit

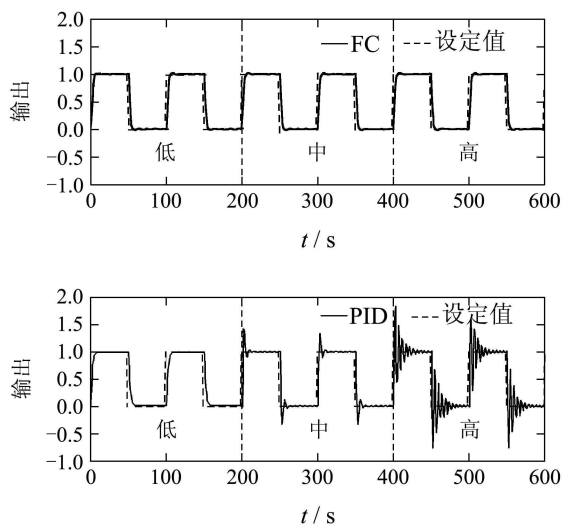


图4 模糊控制与PID控制的输出响应

Fig. 4 Output response of fuzzy and PID controllers

仿真结果表明,最初根据PID控制器参数设计的模糊控制器对第1种工况的控制效果很理想,但是当模型发生变化时,PID控制器和模糊控制器的参数都保持不变的情况下,PID控制器很难适应模型变化,系统震荡强烈,第3种工况时系统几乎无法稳定,而新型模糊控制器却能够很好的工作,适应性很强.经过仿真试验的验证后将该新型模糊控制设计方法应用到HVAC实验室系统的空气处理机组的温度控制中.试验的条件是进入冷却盘管前的冷冻水的温度是固定不变的,测量信号包括水和空气的流速,空气和水的温度,而且冷负荷的变化是通过空气和水的流速得到的.基于大量实验研究得出了如图5所示的实验结果.图中表明与常规PID控制器相比,模糊控制器跟踪迅速,超调时间短,稳定性好,具有较强的鲁棒性.

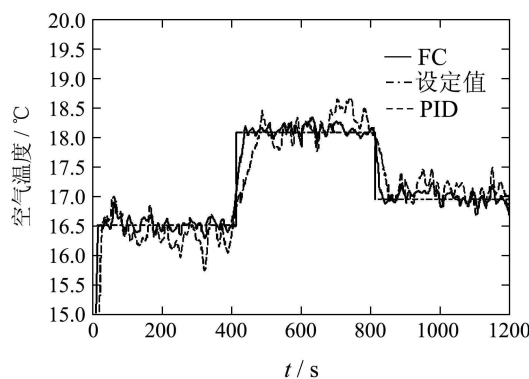


图5 模糊控制器与PID控制器的实验结果

Fig. 5 Experiment result of fuzzy and PID controllers

6 结语(Conclusion)

为了更好的研究非线性系统的复杂控制问题,推广模糊控制器的应用,使模糊控制器的设计更加简单实用,本文提出一种利用PID控制器的增益因子优化和调节模糊控制器的新型设计方法.该方法不仅尝试着将模糊控制器的结构分析这一理论研究成果推广到模糊控制器的应用领域,而且充分利用了常规PID控制器的成熟经验.仿真和实验结果表明,这种模糊控制器的新型设计具有良好的控制性能.

参考文献(References):

- [1] MAMDANI E H. Application of fuzzy algorithms for simple dynamic plant[J]. *Institution of Electrical Engineers*, 1974, 121(12): 1585 - 1588.
- [2] ZADEH L A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetic*, 1973, 3(1): 28 - 44.
- [3] 杜贞斌, 胡寿松. 一类复杂非线性系统的模糊控制[J]. *控制理论与应用*, 2008, 25(4): 780 - 782.
(DU Zhenbin, HU Shousong. Fuzzy control for a class of complex

- nonlinear systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(4): 780 – 782.)
- [4] 刘涵, 刘丁. 基于支持向量机的参数自整定PID非线性系统控制[J]. *控制理论与应用*, 2008, 25(3): 468 – 474.
(LIU Han, LIU Ding. Self-tuning PID controller for a nonlinear system based on support vector machines[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(4): 468 – 474.)
- [5] BI Q, CAI W J, WANG Q G, et al. Advanced controller auto-tuning and its application in HVAC systems[J]. *Control Engineering Practice*, 2000, 8(3): 633 – 644.
- [6] LI H X. An improved robust fuzzy-PID controller with optimal fuzzy reasoning[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 2005, 35(6): 1283 – 1294.
- [7] XU J, HANG C, LIU C. Parallel structure and tuning of a fuzzy PID controller[J]. *Automatica*, 2000, 36(3): 673 – 684.
- [8] HE M, CAI W J. Multiple fuzzy model-based temperature predictive control for HVAC systems[J]. *Information Science*, 2005, 169(1): 155 – 174.

作者简介:

吕红丽 (1978—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为模糊控制等非线性系统的智能控制理论及应用, E-mail: hllv@sdjzu.edu.cn;

段培永 (1968—), 男, 博士生导师, 主要研究方向为智能控制理论与技术、建筑与园区智能化系统等;

崔玉珍 (1973—), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为通信协同、系统仿真;

贾磊 (1959—), 男, 博士生导师, 主要研究方向为预测控制、模糊控制、鲁棒控制等现代控制理论及应用。

(上接第1276页)

7 结论(Conclusions)

本文利用鲁棒可变时域模型预测控制和混合整数线性规划, 成功解决了航天器近距离相对运动的鲁棒控制问题. 所建立的控制器适应性好, 鲁棒性强, 便于工程实现, 为航天器近距离相对运动的精确控制提供了一种可行的选择.

参考文献(References):

- [1] RICHARDS A G. *Robust constrained model predictive control*[D]. Cambridge, MA, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [2] 曹喜滨, 贺东雷. 编队构形保持模型预测控制方法研究[J]. *宇航学报*, 2008, 29(4): 1276 – 1283.
(CAO Xibin, HE Donglei. Research on the model predictive control approach for satellite formation flying[J]. *Journal of Astronautics*, 2008, 29(4): 1276 – 1283.)
- [3] TILLERSON M, HOW J P. Formation flying control in eccentric orbits[C] // *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*. Montreal, Canada: AIAA, 2001: 1 – 11.
- [4] TILLERSON M, INALHAN G, HOW J P. Coordination and control of distributed spacecraft systems using convex optimization techniques[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2002, 12(2): 207 – 242.
- [5] SCHOUWENAARS T. *Safe trajectory planning of autonomous vehicles*[D]. Cambridge, MA, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [6] KERRIGAN E C. *Robust constraint satisfaction: invariant sets and predictive control*[D]. Cambridge, UK: University of Cambridge, 2000.
- [7] Richards A, How J. Performance evaluation of rendezvous using model predictive control[C] // *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*. Austin, Texas, USA: AIAA, 2003: 1 – 9.
- [8] RICHARDS A, HOW J P. Model predictive control of vehicle maneuvers with guaranteed completion time and robust feasibility[C] // *Proceedings of the American Control Conference*. Denver, Colorado, USA: IEEE, 2003: 4034 – 4040.

作者简介:

朱彦伟 (1981—), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为航天器动力学、制导与控制, E-mail: z9812030@hotmail.com;

杨乐平 (1964—), 男, 教授, 博士生导师, 国家863-709重大项目专家组专家, 主要研究方向为空间任务规划、电磁交会对接等, E-mail: ylp_1964@163.com.