航天器精确节能模糊脉冲调宽控制器的设计

周尹强 徐炼新 姜玉宪

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院，北京 100083)

摘 要：为实现航天器精确、节能的姿态或轨道控制，提出一种采用脉冲宽度调制PWM(Pulse Width Modulation)与模糊比例微分PD(Proportional Differential)控制相结合的模糊PD-PWM控制器.其中PWM能将开关型控制转化为相应的精确线性控制，而模糊PD控制在能量消耗限制不同情况下可实现两种快速、节能的控制过程.在分析大气层外拦截器EKV(Extra-atmospheric Kill Vehicle)处于目标捕获和末制导阶段对姿控系统的不同性能要求的基础上，以EKV姿控系统为例介绍了模糊PD-PWM控制器的设计和优化过程.说明了模糊PD控制器隶属度函数的设计、待优化参数的选择以及模糊控制规则的设计，重点叙述了遗传算法GA(Genetic Algorithms)中适应度函数的设计方法，并对隶属度函数进行了优化.仿真结果证明优化后的控制器能满足EKV不同阶段姿态控制要求，具有精确、节能的特点.

关 键 词：脉冲宽度调制(PWM)；模糊控制；遗传算法(GA)

中图分类号：V 448.2

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2008)05-0555-05

Design of fuzzy pulse width modulation controller with accuracy and energy retrenchment applied to spacecraft

Zhou Yinqiang Xu Lianxin Jiang Yuxian

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The fuzzy proportional differential (PD) pulse width modulation (PWM) controller which adopts PWM and fuzzy PD control was introduced into accurate and energy-retrenched control for attitude and orbit of spacecraft. PWM can convert on-off type control to relevant accurate linear control, and fuzzy PD control can implement two speedy and energy retrenched control processes with different consumed energy restricts. The performance demands on attitude control system were analyzed in target-capture and terminal-guidance phases of extra-atmospheric kill vehicle (EKV). Fuzzy PD-PWM controllers were designed and optimized to achieve the demands. The design of membership functions and fuzzy control rules, and the selection on parameters for optimization were discussed for those controllers. Genetic algorithms (GA) were used to optimize the membership functions of input fuzzy variables for expected demands. And the fitness function design for GA was explained. The simulations prove that the optimized controllers can respectively satisfy the demands on attitude control for EKV in different phases with accuracy and energy retrenchment.

Key words: pulse width modulation (PWM); fuzzy control; genetic algorithms (GA)

航天器对姿态或轨道的控制精度有很高的要求，而且携带能源有限、难以及时补充，在控制过程中必须节省能量.当前航天器多采用开关型输出的小推力发动机进行姿态或轨道控制，其特点是推力为常值，开启或关闭时间可以调节，只能产生断续的常值控制推力或力矩.

收稿日期：2007-04-25

作者简介：周尹强(1979—)，男，四川双流人，博士生，ZhouYinQiang@asee.buaa.edu.cn.

为实现对航天器精确的控制,需要对发动机的常值推力进行调制,通过调节开关时间达到变推力的效果.调制方法主要有脉冲调宽PWM(Pulse Width Modulation)、脉冲调宽调频PWPFM(Pulse Width and Pulse Frequency Modulation)、伪速率调制PRM(Pseudo Rate Modulation)等[1-6].这些调制方法通过改变推力的开关时间,使平均输出与输入呈现线性关系,但PWPFM和PRM均需要进行复杂的参数设计[1,5-6].

航天器姿态或轨道控制可使用线性、滑模变结构[7]、模糊[8-9]等控制器,并对推力进行调制.其中模糊控制不需要精确的被控对象模型,能有效地使用专家信息,通过合理的优化可以比线性控制的响应速度更快[8-9]、消耗的能量更少.

本文提出一种由模糊比例微分PD(Proportional Differential)控制器与PWM调制器结合而成的模糊PD-PWM控制器,用于实现对航天器姿态或轨道的精确节能控制,说明了主要设计思想,并以大气层外拦截器EKV(Extra-atmospheric Kill Vehicle)单轴姿态控制为例介绍设计和优化方法.

1 模糊PD-PWM控制器

1.1 PWM调制器模型及其特性

脉冲调制器的作用是将开关型控制转化为等效线性控制,常用的调制方法有:PWM,PWPFM,PRM等.脉冲调制器的调制模型有很多,主要在脉冲调制的周期、脉冲宽度的计算方法、脉冲的作用时刻等方面存在一定的差异,由此对控制的结果也有一定影响[2-4].

本文采用的PWM调制器模型为

$$\left.\begin{aligned} &v=\frac{U}{T}(t-nT)\\ &nT\leqslant t<(n+1)T;n=0,1,2,\cdots\\ &\alpha=u-v\\ &\beta=u+v\\ &I_{\mathrm{C}}(\tau)=\begin{cases}U & \alpha>0\\ -U & \beta<0\\ 0 & \alpha\leqslant 0;\beta\geqslant 0\end{cases}\\ &\tau\in[0,T]\end{aligned}\right\}\quad(1)$$

式中,u为控制信号;v为锯齿波信号;U为常值控制推力或力矩;T为调制周期;α,β为发生器信号;$I_{\mathrm{C}}(\tau)$为控制脉冲,τ为脉冲宽度;t为时间.

可以证明,$I_{\mathrm{C}}(\tau)$输出的τ与$u(t)$的绝对值$|u(t)|$成正比,其极性与输入信号相同.当$|u(t)|$从0变化到U,τ相应地从0变化到T.通过调制,开关型输出可依据u转化为对应的线性输出.如果PWM的调制频率$\omega_{\mathrm{PWM}}=2\pi/T$远高于被控对象的自然频率时,PWM控制可达到与线性控制同等数量级的控制精度.

1.2 模糊PD控制器和遗传算法

在对航天器的姿态或轨道进行控制时,模糊PD控制器比线性PD控制器更加灵活.线性PD控制器的比例和微分系数固定,调节时间和超调量常常相互矛盾:为了减少调节时间会引起较大的超调量,消耗不必要的能量.优化设计的模糊PD控制器可模拟人的控制实现接近于最优的控制过程.以姿态控制为例,当对系统能量消耗有严格限制又无需较快的反应速度时,先输出最大正向控制力矩使系统急加速(以最大正向加速度加速)达到一定角速度后停止输出,接近期望角度时,输出最大负向控制力矩急减速(以最大负向加速度减速),减速停止时系统到达所期望的角度;当要求系统反应速度最快、对能量消耗限制少时,依次输出一个最大正向和一个最大负向控制力矩,使系统急加速后再急减速,当减速停止时系统到达所期望的角度.采用以上方式控制时,不会因超调产生不必要的输出,节省了能量.

模糊控制器设计的关键是隶属度函数和模糊控制规则的设计,这涉及到多变量的寻优问题.遗传算法GA(Genetic Algorithms)是一种可以实现多变量全局寻优的优化算法,对模糊控制器的隶属度函数和模糊控制规则都可以进行优化,广泛应用于模糊控制器的优化设计[10-11].

将模糊PD控制器与PWM调制器结合,就构成了模糊PD-PWM控制器.这种控制器在经过合理设计和优化后,既可利用模糊PD控制达到快速、节能的特性,又可通过PWM对开关型输出的调制达到较高的控制精度,能对航天器进行精确节能的姿态或轨道控制.以下介绍该控制器应用于EKV姿控系统时的设计和优化过程.

2 EKV姿态控制器设计和优化

2.1 EKV的姿态控制及要求

若不计惯性耦合和忽略自然阻尼力矩,EKV某个体轴的角度$\theta(t)$的动力学方程为

$$\ddot{\theta}(t)=E(I_{\mathrm{C}}(\tau))\quad(2)$$

式中,$\ddot{\theta}(t)$为EKV的角加速度;$E(I_{\mathrm{C}}(\tau))$为控制脉冲产生的角加速度.经过估算:

$$E(U)=U/J\approx 1.34\ \mathrm{rad/s^2}\quad(3)$$

式中,U为EKV绕该轴的常值控制力矩;J为

EKV 绕该轴的惯性矩.

EKV 对姿控系统的要求随着所处的阶段而改变:在目标捕获阶段,EKV 与目标之间视线距大、视线角变化率小,EKV 以较小的反应速度即可跟踪目标,但过渡时间长,姿控系统需要节省能量;在末制导阶段,EKV 与目标之间视线距减小、视线角变化率增大,EKV 以较大的反应速度才能锁定目标,姿控系统应优先保证反应速度. 为满足以上要求,需根据 EKV 所处不同阶段分别设计姿态控制器,两者的切换根据视线距的大小进行.

2.2　模糊 PD 控制器的设计及优化

模糊 PD-PWM 控制器应用于 EKV 姿控系统时,模糊 PD 控制器的输入为姿态角误差 $\Delta\theta$ 和姿态角误差变化率 $\Delta\dot{\theta}$,输出为 PWM 调制器的控制信号 u,需要设计模糊变量的隶属度函数和模糊控制规则,两者共同影响模糊 PD 控制器的性能[10−12].

2.2.1　模糊变量隶属度函数的设计

模糊控制器进行模糊推理之前,应将输入变量归一化转化为无量纲的模糊变量. 模糊推理输出的无量纲模糊变量也应转换为有实际意义的输出值[12]. $\Delta\theta$ 和 $\Delta\dot{\theta}$ 对应的归一化输入值分别为 $\Delta\theta_N$ 和 $\Delta\dot{\theta}_N$,u 对应的归一化输出值为 u_N. $\Delta\theta_N$,$\Delta\dot{\theta}_N$ 和 u_N 的论域均为[−1.0,1.0]. 模糊值定义如下:P(正),ZE(零),N(负),S(小),M(中),B(大).

$\Delta\theta_N$ 和 $\Delta\dot{\theta}_N$ 的隶属度函数的设计见图 1 所示,图 1 中 x_1,x_2,x_3,x_4,x_5 为待定参数,需经过优化后确定其具体数值. 为了保证系统控制精度,指定 $\Delta\theta_N$ 和 $\Delta\dot{\theta}_N$ 为 ZE 时的隶属度函数为关于原点对称的窄三角形. 待定参数的变化将改变 $\Delta\theta_N$(或 $\Delta\dot{\theta}_N$)的隶属度函数的形状,通过改变待定参数可调节模糊 PD 控制器的性能.

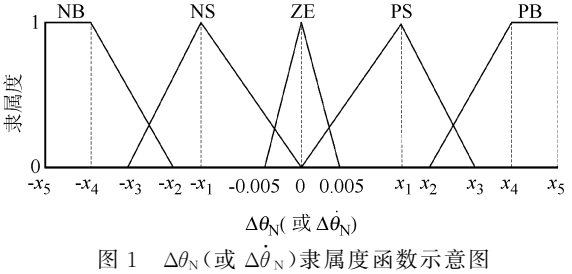


图 1　$\Delta\theta_N$(或 $\Delta\dot{\theta}_N$)隶属度函数示意图

为减少待定参数个数,u_N 的隶属度函数依照经验进行设计,具体见图 2.

2.2.2　模糊控制规则的设计

姿态控制问题借鉴前人的控制策略能得到较好的控制规则[8−9],对 EKV 不同阶段分别按以下控制要求设计模糊控制规则:目标捕获阶段需节省能量,并使系统具有一定的反应速度,具体见表 1;末制导阶段需加快系统反应速度,控制规则与目标捕获阶段局部稍有不同,具体见表 2.

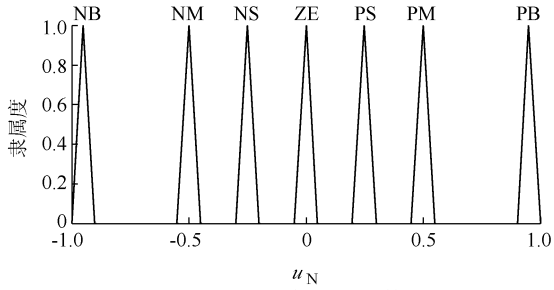


图 2　u_N 隶属度函数

表 1　模糊控制规则(目标捕获段)

$\Delta\theta_N$	$\Delta\dot{\theta}_N$				
	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NS	NB	NM	NM	NS	PS
ZE	NM	NS	ZE	PS	PM
PS	NS	PS	PM	PM	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB

表 2　模糊控制规则(末制导段)

$\Delta\theta_N$	$\Delta\dot{\theta}_N$				
	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	PS
NS	NB	NB	NS	PS	PB
ZE	NB	NS	ZE	PS	PB
PS	NB	NS	PS	PB	PB
PB	PS	PS	PB	PB	PB

表 1 和表 2 中控制量为离散模糊值,通过“面积中心法”反模糊化后可得连续的输出值.

2.2.3　GA 的优化

为满足 EKV 在不同阶段对姿控系统的不同要求,在前述设计基础上,对 $\Delta\theta_N$ 和 $\Delta\dot{\theta}_N$ 隶属度函数的待定参数进行了 GA 优化[10−11].

选取适当的适应度函数是 GA 进行优化的关键:适应度函数必须正确反映不同组参数对系统的控制性能要求的满足程度,才能得到合理的优化结果. EKV 的姿态控制过程中,$\Delta\theta$ 绝对值的积分 $S_e=\int_0^\infty|\Delta\theta|\,dt$ 综合反映了系统响应速度的快慢和稳态误差的大小;而 u 绝对值的积分 $S_c=\int_0^\infty|u|\,dt$ 则反映了控制过程中消耗能量的多少,采用 PWM 调制器对 u 进行调制时,取 $S_c=\int_0^\infty|I_C(\tau)|\,dt$.

在 EKV 的不同阶段,适应度函数应综合考

虑以上两个因素并有所侧重.

适应度函数 F 设计为 S_e 和 S_c 的加权和,并根据不同阶段选取不同权值组合.

目标捕获阶段:

$$F = S_e \times 10 + S_c \times 10$$

末制导阶段:

$$F = S_e \times 100 + S_c$$

其中,S_e 权值越大,越着重于加快反应快速性和减小稳态误差;S_c 权值越大,越着重于减少能量消耗.

F 的计算流程如下:

1) 输入一组参数,对参数进行排序、归一化等预处理;

2) 使用预处理后的参数形成模糊 PD 控制器输入模糊隶属度函数,与已有的输出隶属度函数、模糊控制规则一起构建模糊 PD 控制器;

3) 使用上述模糊 PD 控制器,调用系统的 Simulink 模型进行仿真计算;

4) 根据仿真结果,计算本次输入参数的适应度函数值并返回.

在仿真时,t 只需取系统进入稳态的时间,设计过程中取 $t=5$ s,仿真框图见图 3.

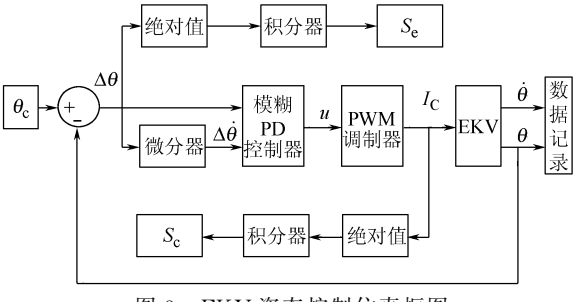


图 3 EKV 姿态控制仿真框图

图 3 中角度指令 $\theta_c=0.1$ rad,EKV 的高压冷气发动机作动电磁阀的响应时间为 3～5 ms[13],因此取 $T=0.1$ s. 同时假设 PWM 调制器死区为输入值的 0.2%.

在优化的过程中使用了 Matlab 提供的 GA 工具 gatool. gatool 以适应度函数取得最小值为优化目标,在设置适应度函数、待优化参数个数、初始种群数目、参数初始范围、交叉方法和变异方法及终止条件等后就可进行优化.

2.3 设计结果

经过 GA 优化后得到模糊 PD 控制器. 为进行对比,分别设计两个线性 PD 控制器,其调节时间(5%)与对应的模糊 PD 控制器一致. 目标捕获段的线性 PD 控制器阻尼比 $\zeta=1$,没有超调;末制导段线性 PD 控制器 $\zeta=0.707$,超调最小、响应最快. 模糊 PD 控制器和线性 PD 控制器的输出都经 PWM 调制后对 EKV 姿态进行控制.

1) 目标捕获阶段

θ 的响应曲线见图 4. 将模糊 PD 控制器与线性 PD 控制器相比较,可见两者达到同样的控制精度,但前者进入稳态时间更短. 前者 S_c 值为 0.124 2,后者 S_c 值为 0.175 7,前者更加节能.

从图 5 可以看出,此时系统 $E(I_C(\tau))$ 和 $\dot{\theta}$ 响应与 1.2 节中所述系统能量消耗有严格限制又无需较快的反应速度的控制过程相似.

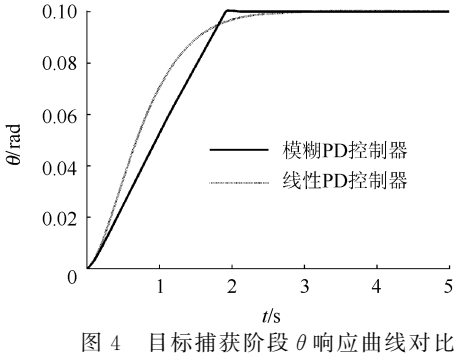


图 4 目标捕获阶段 θ 响应曲线对比

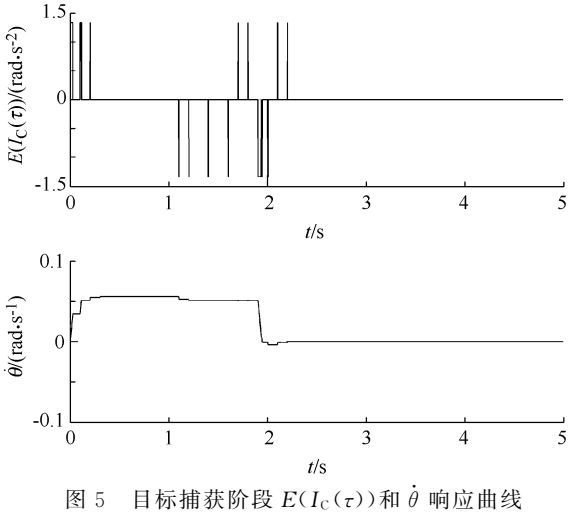


图 5 目标捕获阶段 $E(I_C(\tau))$ 和 $\dot{\theta}$ 响应曲线

2) 末制导阶段

θ 的响应曲线见图 6. 将模糊 PD 控制器与线性 PD 控制器相比较,两者达到同样的控制精度,

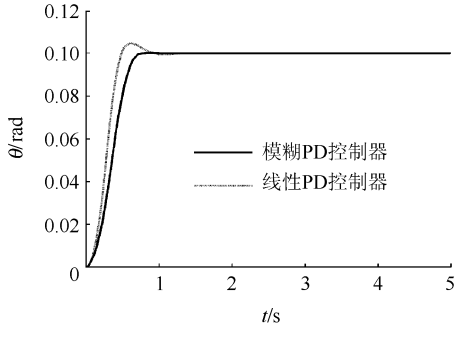


图 6 末制导阶段 θ 响应曲线对比

且前者超调更小、进入稳态时间更短.前者 S_c 值为 0.504 7,后者 S_c 值为 0.767 1,前者更加节能.

从图 7 可以看出,此时系统 $E(I_C(\tau))$ 和 $\dot{\theta}$ 响应与 1.2 节中所述反应速度最快、能量消耗限制少的控制过程相似.

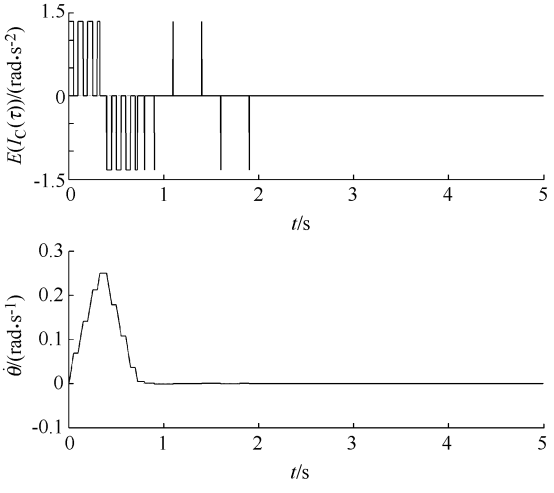


图 7　末制导阶段 $E(I_C(\tau))$ 和 $\dot{\theta}$ 响应曲线

3　结 束 语

仿真结果证明,针对 EKV 在不同阶段对姿态控制系统的不同要求,经过合理设计和 GA 优化后得到的模糊 PD-PWM 控制器的性能优于线性 PD 控制器,能够实现对 EKV 姿态的精确、节能控制.该控制器调制模型简单、设计过程较为简便、易于实现,在航天器姿态和轨道控制中具有一定的应用前景.

本文中模糊 PD-PWM 控制器虽具有精确、节能的特性,但未充分利用系统最大的控制能力,如何进一步提高其性能有待探索.在仿真过程中没有加入实际系统中可能存在的惯性和延时等非线性特性,这些因素对系统控制性能的影响也有待更深入的研究.

参考文献 (References)

[1] Tobin T C, Wie B. Pulsed-modulated control synthesis for a flexible spacecraft[J]. AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1990, 13(6):1014－1022

[2] Zimpfer J D, Shieh S L, Sunkel W J. Digitally redesigned pulse-width modulation spacecraft control[J]. AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1998, 21(4):1700－1709

[3] Ieko T, Ochit Y, Kanai K. A new digital redesign method for pulse-width modulation control system[R]. AIAA 97-3770,1997

[4] Bernelli Z F, Mantegazza P. Pulse-width equivalent to pulse-amplitude discrete control of linear systems[J]. AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1992,15(2):461－467

[5] Song Gangbing, Buck V N, Agrawal N B. Spacecraft vibration reduction using pulse-width pulse-frequency modulated input shaper[R]. AIAA 97-3748,1997

[6] 耿云海,张明国,曹喜滨. 挠性飞行器姿态机动脉冲调宽控制系统设计[J]. 飞行力学,2005,23(4):40－44
Geng Yunhai, Zhang Mingguo, Cao Xibin. Pulse width modulated attitude maneuver control system design for a flexible vehicle[J]. Flight Dynamic, 2005,23(4):40－44(in Chinese)

[7] 唐超颖,沈春林,李丽荣. 航天器姿态滑模变结构控制系统的设计[J]. 南京航空航天大学学报,2003,35(4):361－365
Tang Chaoying , Shen Chunlin, Li lirong. Variable-structure control with sliding mode of spacecraft attitude maneuvers[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 35(4):361－365(in Chinese)

[8] 靳文涛,魏明英,孙连举. 拦截器姿态控制系统的模糊控制设计方法研究[J]. 系统工程与电子技术,2005,27(4):696－699
Jin Wentao, Wei Mingying, Sun Lianju. Study on the design methods of the interceptor's attitude control system based on fuzzy control[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(4):696－699(in Chinese)

[9] 鲍巍,杨明,王子才. 基于模糊控制的拦截弹姿态控制器设计方法研究[J]. 航天控制, 2005,23(1):51－57
Bao Wei, Yang Ming, Wang Zicai. Research on the method for designing interceptor fuzzy controller[J]. Aerospace Control, 2005, 23(1):51－57(in Chinese)

[10] 曹承志,李海平. 用遗传算法优化模糊控制器的实现方法[J]. 计算机仿真,2003,20(1):56－58
Cao Chengzhi, Li Haiping. A genetic algorithm for membership functions optimization in fuzzy logic controller : a MATLAB implementation [J]. Computer Simulation, 2003, 20(1):56－58(in Chinese)

[11] 张新燕, 王维庆. 用遗传算法对模糊量的隶属函数进行优化[J]. 山东大学学报(工学版),2005,35(5):45－47
Zhang Xinyan, Wang Weiqing. Using genetic algorithm to optimize the membership function of the fuzzy variables while design the fuzzy controllers[J]. Journal of Shandong University(Engineering Science), 2005, 35(5):45－47(in Chinese)

[12] 李国勇. 智能控制及其 MATLAB 实现[M]. 北京:电子工业出版社,2005:194－261
Li Guoyong. Intelligent control and its implement in MATLAB[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry,2005:194－261(in Chinese)

[13] Yasuhara W K, Finato S R, Olson A M. Advanced gel propulsion controls for kill vehicles[R]. AIAA 93-2636,1993

(责任编辑:刘登敏)