基于决策树的空间拦截器姿态控制

全 权 蔡开元

(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: 拦截器的发动机为带脉冲型发动机,从而限定了作动器的输出集. 对于该拦截器的姿态控制,提出了基于决策树的控制方法. 它是通过搜索决策树代价最小的路径做出控制决策,该控制思想非常类似棋手博弈的思想. 提出的剪枝方案降低了决策树的计算复杂度. 通过仿真实验说明:基于决策树的控制具有一定的智能;不同剪枝方案产生不同的控制效果;该方法较好地解决了输入受到约束、非线性和耦合的多输入多输出控制问题,并且在满足控制精度前提下可减少发动机切换次数和燃料消耗.

关 键 词: 预测控制系统; 树; 姿态控制

中图分类号: TP 273

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)10-1163-05

Control of attitude of the space interceptor based decision tree

Quan Quan Cai Kaiyuan

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

Abstract: The idea of control based decision tree was proposed for attitude control of the space interceptor with the on-off actuators. Control decision was made every time by searching the decision tree for the path of minimum cost . The idea is quite similar to that of playing chess. The proposed pruning stragey reduced computational complexity of the decision tree. The simulation results suggest that the control based decision tree is intelligent and different pruning strategies bring different results. The simulation results also suggest that this method preferably solves the multiple input multiple output (MIMO) control problem of nonlinear and coupling system which subjects to restricted control input. This method also reduces the switch count and the consumed fuel of the engine under the precondition of meeting the control accuracy.

Key words: predictive control systems; trees; attitude control

当空间拦截器进入末制导阶段后,为了搜索并跟踪目标,拦截器的姿态可能需要作大角度调整,而且要求快速性. 在捕获目标之后,姿态控制的主要任务则是令探测器能够稳定地跟踪目标,即将目标始终保持在视场范围之内[1]. 拦截器的发动机为带脉冲型发动机,该类发动机控制输出为脉冲且有最小开机时间的限制.

本文的姿态控制系统具有输入受到约束、非线性和耦合的特点,需要在满足控制精度前提下,尽量减少发动机切换次数和消耗燃料.

现今已经有了几种控制方法,并在大角度机动控制中得到了很大应用,但这些控制方法都有自身的缺陷. 最优控制理论[2-3]需要精确模型且用于实时控制还比较困难. 变结构控制理论[4]没有考虑到执行机构的输出约束. 脉宽调频调制(PWPF)技术[5],需要精确模型且计算较为复杂. 模型预测控制(MPC)[6-7]在输入受到约束姿态控制中得到了成功的运用,但现有的方案中基本上应用较为复杂的优化理论,用于实时控制还比较困难. 此外,在航天器姿态控制领域,模糊控制[8]和神经网络技术[9]作为一种辅助控制方法得到越来越多的关注.

本文基于决策树的控制采用了模型预测控制的基本思想,并运用了人工智能中树的搜索理论,

收稿日期: 2006-05-16

作者简介: 全 权(1981-),男,湖南衡阳人,博士生, qq_buaa@asee.buaa.edu.cn.

旨在建立一种易被工程上人员理解和工程上易被实现的新方法.

1 姿态控制问题的数学描述

拦截器的姿态运动方程描述了其姿态运动变化规律. 安装在拦截器上的姿态发动机(如图1)可以为弹体的姿态变化提供控制力矩[1].

$$\left.\begin{aligned}
\dot{\omega}_{x1} &= (J_{y1}-J_{z1})\omega_{y1}\omega_{z1}+M_{x1}\\
\dot{\omega}_{y1} &= (J_{z1}-J_{x1})\omega_{z1}\omega_{x1}+M_{y1}\\
\dot{\omega}_{z1} &= (J_{x1}-J_{y1})\omega_{x1}\omega_{y1}+M_{z1}\\
\dot{\eta} &= \omega_{y1}\sin\gamma+\omega_{z1}\cos\gamma\\
\dot{\psi} &= (\omega_{y1}\cos\gamma-\omega_{z1}\sin\gamma)/\cos\eta\\
\dot{\gamma} &= \omega_{x1}-\tan\eta(\omega_{y1}\cos\gamma-\omega_{z1}\sin\gamma)
\end{aligned}\right\} \quad (1)$$

式中,J_{x1},J_{y1},J_{z1}分别代表拦截器沿弹体系3个轴的转动惯量;ω_{x1},ω_{y1},ω_{z1}分别代表拦截器沿弹体系3个轴的转动角速度;M_{x1},M_{y1},M_{z1}分别代表作用于拦截器弹体系3个轴的控制力矩;η,ψ,γ分别代表拦截器的俯仰角、偏航角和滚转角.

被控对象(1)可表述为

$$\left.\begin{aligned}
\dot{\boldsymbol{X}}(t) &= \boldsymbol{F}(\boldsymbol{X}(t))+\boldsymbol{G}(\boldsymbol{X}(t))\boldsymbol{U}(t)\\
\boldsymbol{Y}(t) &= \boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}(t)
\end{aligned}\right\} \quad (2)$$

其中

$$\boldsymbol{X}=(\omega_{x1},\omega_{y1},\omega_{z1},\eta,\psi,\gamma)^{\mathrm{T}}$$

以上的控制问题可以看成为作动器受限的3输入3输出问题,控制约束:力矩大小固定且有最小开机时间(见图2);控制指标:在控制精度满足要求前提下,要求发动机切换次数和耗燃料尽量少.

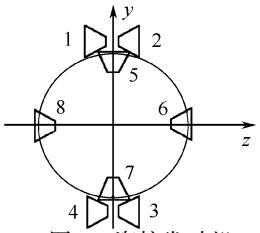


图1 姿控发动机布局(从尾部看)

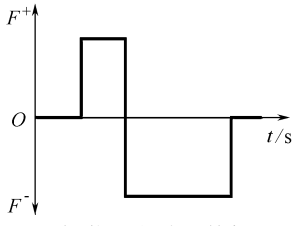


图2 拦截器发动机外部推力特性示意图

2 非线性模型预测控制问题

通常,非线性模型预测控制(NMPC)在t时刻初始条件为$x(t)$开环优化问题可描述为[10]

$$\left.\begin{aligned}
&\min_{u\in U} J(x(t),u,T)=\int_t^{t+T}F(x(t),u)\,\mathrm{d}\tau\\
&\text{s.t.}\quad \dot{x}(\tau)=f(x(\tau),u(\tau))\\
&\qquad x(\tau)\in X\qquad t\leqslant\tau\leqslant t+T
\end{aligned}\right\} \quad (3)$$

式中,U为所有允许控制序列(即满足控制约束的控制序列)的集合;X为状态约束集.

NMPC的基本原理是利用一个过程动态模型和可测量信息预测将来的过程行为,并使预测的过程响应和设计的响应的差别最小.

NMPC方法中优化方法非常复杂,难以计算;其次,非线性预测控制中,常采用局部线性化解决计算量这一难题,因此无法保证全局优化[11]. 如果代价函数$J(x(t),u,T)$或者系统模型$\dot{x}(\tau)=f(x(\tau),u(\tau))$无法解析表达,那么传统的优化方法将无法运用. 比如:姿态控制问题中,发动机开关切换次数少的约束就很难解析表达. 面对以上的控制问题,NMPC解决起来显得过于复杂,而比较适合本文提出的基于决策树的控制.

基于决策树的控制应用了NMPC的标称系统模型和优化的思想,从广义的角度来说也属于NMPC的范畴,但其解决计算复杂性和非解析模型的方法框架是与传统NMPC截然不同. 下一节将结合姿态控制,对该方法进行比较详细的介绍.

3 基于决策树的控制

通过基于决策树的思想,人类可以研制出与棋手对弈的程序,并取得了巨大的成功. 如IBM的"深蓝"战胜世界国际象棋冠军卡斯帕罗夫就是靠最优路径搜索完成的[12]. 文献[13]中利用该思想对车摆(cart-pendulum)进行了控制;文献[14]是关于线性控制系统的切换问题,它是通过对决策树的剪枝,最后做出控制决策. 可见将该思想引入到控制中,控制器将能像人一样或很有可能比人做得更好地完成控制任务.

文献[13]通过建立决策树将初始状态和目标状态连接即使对决策树剪枝计算量仍然很大,而文献[14]剪枝方法复杂,所以都较难满足在线控制的要求.

本文将以空间拦截器姿态控制为对象建立基于决策树的控制的基本框架,并通过基于决策树的思想设计在线的控制算法,证实方法的可行性.

3.1 生成决策树

与棋手一样,控制器需要了解每一种控制方案所产生的代价,控制器的输出集为$\{U_1,U_2,\cdots,U_M\}$,一次决策有M种方案,2次决策有M^2种方案. 初始控制序列为$\kappa_{\mathrm{expand}}(k)=\{\varnothing\}$,控制序列集合的递推式$\kappa_{\mathrm{expand}}(n+1)=\{U_1,U_2,\cdots,U_M\}\times\kappa_{\mathrm{expand}}(n)$,$n\geqslant k$,那么第$\kappa_{\mathrm{expand}}(N)$有$M^{N-k}$种控制方案. 初始状态是$\boldsymbol{X}(k)$,从$\boldsymbol{X}(k)$出发,对于不同的控制序列,利用标称系统递推最终将产生不同

的输出状态 $\boldsymbol{X}(N)$. 这一过程可以由图 3 所示的树表示.

本文姿态控制问题中,控制器的输出集为 $\left\{(M_{x1},M_{y1},M_{z1})\left|\begin{matrix}M_{x1}\in\{M_{x1}^{-},0,M_{x1}^{+}\}\\M_{y1}\in\{M_{y1}^{-},0,M_{y1}^{+}\}\\M_{z1}\in\{M_{z1}^{-},0,M_{z1}^{+}\}\end{matrix}\right.\right\}$ 那么 $M=27$,$\kappa_{\text{expand}}(N)$有 27^{N-k}种控制方案.

如果目标要达到 $\boldsymbol{X}_{\text{c}}$ 状态(如图 3 所示),可见到达目标有不同的路径,即不同的控制方案,但是选择不同的路径所产生的代价不同. 本方法的目的是通过搜索决策树,按代价函数找到最优路径.

可见该方法对于非解析模型和约束仍然有效,比如:IF…THEN 模型和发动机开关切换次数少的约束等.

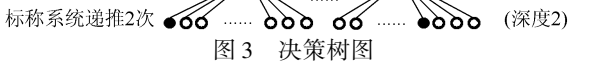


图 3　决策树图

3.2　剪枝方案和最优路径

目前这种方法的计算仍然相当复杂,树以指数形式生长,为了避免这种情况,要对树进行剪枝. 同样在实际中,无论是棋手还是“深蓝”在下棋时都在对决策树进行剪枝,否则都无法承受巨大的计算量.

定义 $\kappa_{\text{cand}}(n)$ 为候选控制序列集合,剪枝算法和最优路径步骤如下:

1) $\kappa_{\text{expand}}(k)=\kappa_{\text{cand}}(k)=\{\varnothing\}$, $n=k$.

2) 以迭代式:$\kappa_{\text{expand}}(n+1)=\{U_1,U_2,\cdots,U_M\}\times\kappa_{\text{cand}}(n)$递推,$\kappa_{\text{cand}}(n+1)=\{\varnothing\}$.

3) 利用标称系统递推,计算所有 $K\in\kappa_{\text{expand}}(n+1)$的控制序列的代价 $J_1(K)$,确定候选控制序列代价阈值 $J_{1\text{T}}$.

4) 令$\kappa'_{\text{cand}}(n+1)=\{\varnothing\}$,对于 3)中的 K 如果 $J_1(K)\leqslant J_{1\text{T}}$,则$\kappa'_{\text{cand}}(n+1)=\kappa'_{\text{cand}}(n+1)\cup K$.

5) 计算所有 $K\in\kappa'_{\text{cand}}(n+1)$的代价 $J_2(K)$,确定候选控制序列代价阈值 $J_{2\text{T}}$.

6) 对于 5)中的 K 如果 $J_2(K)\leqslant J_{2\text{T}}$,则$\kappa_{\text{cand}}(n+1)=\kappa'_{\text{cand}}(n+1)\cup K$.

7) 如果 $n+1=N$ 到第 8)步,否则 $n=n+1$ 返回第 2)步.

8) 计算所有 $K\in\kappa_{\text{cand}}(N)$的代价 $C(K)$,找出最小代价对应的控制序列 K^{*}.

标称系统递推次数 $N-k$ 不能太大,即要对树的深度进行限制. 因为标称系统与实际系统有差距,递推预测量与系统实际量将随着递推次数的增加而差距越大,最后得到结果将不可信,况且也同样会导致繁重的计算量.

对剪枝算法和最优路径选用不同的代价函数,将产生不同的控制序列 K^{*}. 姿态控制问题中,本文采用了 2 种方案.

方案 1

$J_1(K)=\|\boldsymbol{W}_1\boldsymbol{E}(K)+\boldsymbol{W}_2\text{d}\boldsymbol{E}(K)\|_{\infty}$

$J_2(K)\leqslant J_{2\text{T}}$, $C(K)=J_1(K)$.

方案 2

$J_1(K)=\|\boldsymbol{W}_1\boldsymbol{E}(K)+\boldsymbol{W}_2\text{d}\boldsymbol{E}(K)\|_{\infty}$

$J_2(K)=C(K)=Q(K)$, Q 是关于发动机切换次数和消耗燃料的代价函数.

其中 $\boldsymbol{E}(K)$表示控制序列 K 作用在标称系统上所产生的误差,而 $\text{d}\boldsymbol{E}(K)=\dot{\boldsymbol{E}}(K)$;$\boldsymbol{W}_1$ 和 $\boldsymbol{W}_2$ 分别为误差和误差变化率的代价矩阵.

3.3　基于决策树的控制

基于决策树的控制算法步骤:

1) 在线修正标称系统模型形式;

2) 根据当前状况,确定代价函数 J_1,J_2,C 形式、控制序列代价阈值 $J_{1\text{T}},J_{2\text{T}}$,树的深度 $N-k$ 以及控制周期 T 等初始条件;

3) 按上节的方法进行剪枝,并搜索找出最优路径;

4) 根据最优路径做控制决策,返回 1).

标称系统模型可分为机理模型、试验模型、智能模型和基于线性化模型. 本文采用的是机理模型,通过自适应和系统辨识方法,该模型可以被在线修正.

本问题将被控对象式(2)以 Δt 为离散时间周期,欧拉离散化后作为标称系统模型:

$$\left.\begin{aligned}\boldsymbol{X}(k+1)&=\boldsymbol{X}(k)+\boldsymbol{F}(\boldsymbol{X}(k))\Delta t+\\&\qquad\boldsymbol{G}(\boldsymbol{X}(k))\Delta t\boldsymbol{U}(k)\\\boldsymbol{Y}(k)&=\boldsymbol{C}^{\text{T}}\boldsymbol{X}(k)\end{aligned}\right\}\tag{4}$$

步骤 2) 中代价函数 J_1,J_2,C 形式的不同将产生不同的控制效果,而控制序列代价阈值 $J_{1\text{T}},J_{2\text{T}}$越小,生成树的规模越小,计算复杂性也就越小.

步骤 3) 中的剪枝方法有很多种,本文只列出其中 2 种. 好的剪枝方法能够大大减少建立和搜索树时的计算量,也正因如此本方法才有可行性.

最后,根据最优路径做出当前步的控制决策,也可以做出连续几步的控制决策.

4　实验仿真

默认初始参数:式(1)中,$J_{x1}=1.6\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$,$J_{y1}$

$=24\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$, $J_{z1}=24\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$. $M_{x1}=30.576\ \text{N}\cdot\text{m}$, $M_{y1}=156.8\ \text{N}\cdot\text{m}$, $M_{z1}=156.8\ \text{N}\cdot\text{m}$. 方案1、方案2中:

$$\boldsymbol{W}_1=\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{bmatrix}\qquad \boldsymbol{W}_2=\begin{bmatrix}0.5&0&0\\0&0.5&0\\0&0&0.05\end{bmatrix}$$

仿真周期 $s=0.0005\ \text{s}$, 控制决策周期 $T=0.025\ \text{s}$, 离散时间周期 $\Delta t=0.005\ \text{s}$, 树的深度 $N-k=1$、每次候选控制序列产生代价按升序排列, 第 p 个元素用 $r(p)$ 表示, $J_{1T}=r(2)$; 由于以下控制决策周期都大于最小开机时间, 所以该约束不用考虑.

4.1 初始参数选择实验

初始条件: 拦截器沿弹体系3个轴的初始转动角速度 $\omega_{x1}=0$, $\omega_{y1}=0$, $\omega_{z1}=0$; 初始姿态角和 $\eta_0=0$, $\psi_0=0$, $\gamma_0=0$; 初始期望姿态角 $\eta_e=0.2\ \text{rad}$, $\psi_e=-0.3\ \text{rad}$, $\gamma_e=-0.4\ \text{rad}$, 响应姿态角为 η_t, ψ_t, γ_t.

本节实验采用方案1进行剪枝和寻优, 如图4所示, 图4b中 $T=0.01\ \text{s}$ 意味着决策更加频繁; 图4c中树的深度 $N-k=2$ 意味着思考的深度更深, 图4d中 $J_{1T}=r(3)$ 意味着思考得更全面. 同样的仿真条件下, 控制决策周期的减少和 J_{1T} 的增加所得到的调节时间比默认设置时小或至少相同(见图4b、图4d). 树深度的增加可以使超调量减少, 但不能像以上2个因素能够保证控制精度(见图4c). 因为标称系统模型递推次数的增加, 带来误差也就更大.

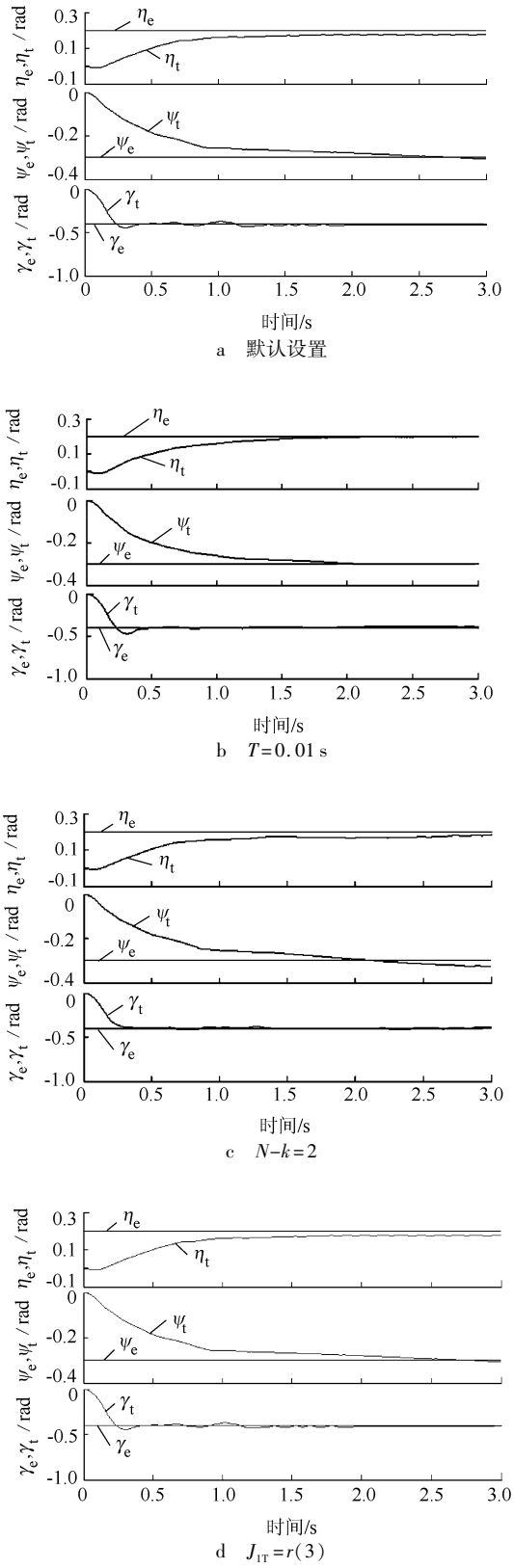
类比人做事情, 可以得到类似的结论. 对事情经常打理(决策频繁), 对事情想得全面(J_{1T}越大)当然有利于人们做好事情, 对事情有前瞻性考虑($N-k$ 越大), 所以能够避免一些不利的事情发生.

4.2 方案比较实验

默认初始参数设置中, 更新参数 $T=0.01\ \text{s}$, $N-k=2$, $J_{1T}=r(3)$. 初始条件: 拦截器沿弹体系3个轴的初始转动角速度 $\omega_{x1}=0$, $\omega_{y1}=0$, $\omega_{z1}=0$; 初始姿态角 $\eta_0=1\ \text{rad}$, $\psi_0=1\ \text{rad}$, $\gamma_0=-1\ \text{rad}$, 期望姿态角 $\eta_e=1.3\ \text{rad}$, $\psi_e=0.3\ \text{rad}$, $\gamma_e=-0.7\ \text{rad}$. 2种方案比较如图5、图6所示.

为了比较2种方案, 定义切换次数 S 和燃料消耗 F. S 表示俯仰、偏航和滚转力矩上升和下降沿个数之和, 如图2中 $S=3$; 而 $F=\sum_{i=1}^{N_1}s(|M_{x1}(i)|+|M_{y1}(i)|+|M_{z1}(i)|)$, N_1 为整个仿真的周期数.

以上2个指标只是用来衡量发动机开关机次数和燃料消耗的大小, 本文按无量纲处理.



a 默认设置

b $T=0.01\ \text{s}$

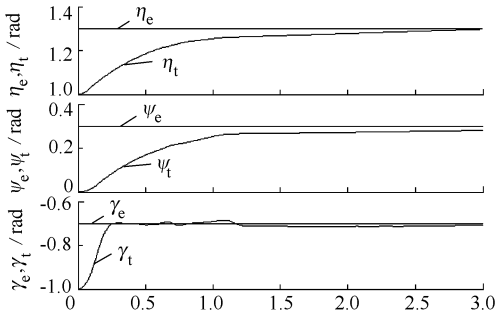
c $N-k=2$

d $J_{1T}=r(3)$

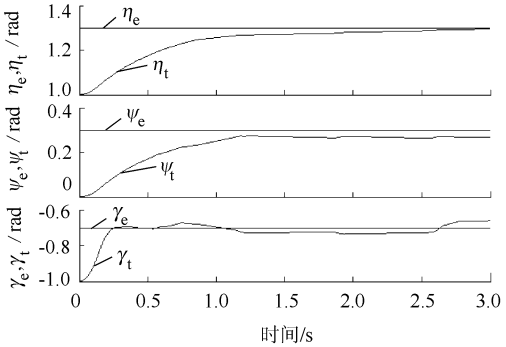
图4 拦截器姿态角响应曲线图

方案1中 $F=128$, $S=150$, 方案2中 $F=79$, $S=91$.

在控制精度上, 方案2稍微逊色于方案1, 但是方案2在燃料和开机次数上比方案1少得多,

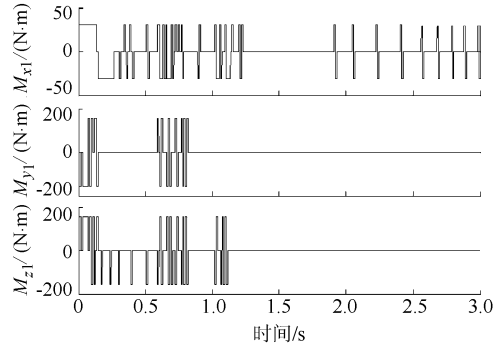


a　方案 1

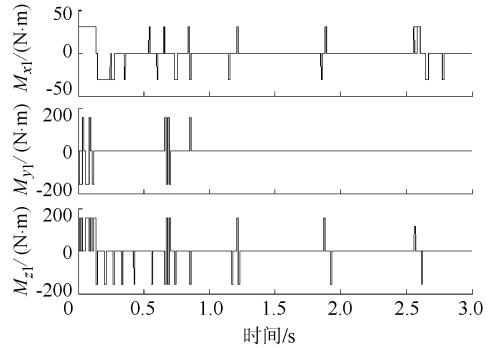


b　方案 2

图 5　不同剪枝方案栏截器姿态角响应曲线图



a　方案 1



b　方案 2

图 6　不同剪枝方案发动机输出力矩图

这也是预期设计的结果.

为了更好地对比以上 2 种方案,拦截器沿弹体系 3 个轴的初始转动角速度取 $\omega_{x1}=0,\omega_{y1}=0,\omega_{z1}=0$,拦截器的初始姿态角在$\{(\eta_0,\psi_0,\gamma_0)\mid\eta_0,\psi_0,\gamma_0\in\{-1,-0.5,0,0.5,1\}\}$集合中取值;对应期望姿态角为$(\eta_0+\Delta\eta,\psi_0+\Delta\psi,\gamma_0+\Delta\gamma)$,$\Delta\eta=\Delta\psi=\Delta\gamma=0.2$ rad,共做 125 组实验,在满足一定精度的前提下,燃料和开机次数对比结果如表 1 所示.

表 1　剪枝方案对比表

方案	燃料最小	燃料最大	燃料平均	切换次数最小	切换次数最大	切换次数平均
方案 1	96	606	322	125	574	369
方案 2	68	422	188	85	329	202

5　结 束 语

针对本文控制对象的特点,本文提出了基于决策树的控制方法,该方法利用被控对象模型与有限控制方案建立决策树,使控制器有着如同棋手的思维. 通过实验仿真证实了控制方案初始参数的选择过程与人的思维过程有着许多相似之处. 为了减少计算量,本文采取了剪枝方案,剪枝方案侧重不同直接影响控制效果.

基于决策树的控制能够解决一些非解析模型和约束的控制问题,而这些问题在非线性模型预测控制的框架下是难以被解决的,这些是基于决策树的控制相比非线性模型预测控制的优势所在.

参考文献 (References)

[1] 周荻,慕春棣,徐文立. 空间拦截器姿态的组合控制[J]. 清华大学学报(自然科学版),1999,39(1):106-109
Zhou Di, Mu Chundi, Xu Wenli. Integrated control for space interceptor's attitude[J]. Tsinghua Science and Technology, 1999, 39(1):106-109(in Chinese)

[2] Luo Wencheng, Chu Yun-chung, Ling Keck-voon. Inverse optimal adaptive control for attitude tracking of spacecraft [J]. IEEE Transaction on Automatic Control, 2005, 50(11):1639-1654

[3] Sharma R, Tewari A. Optimal nonlinear tracking of spacecraft attitude maneuvers [J]. IEEE Transaction on Control Systems Technology, 2004, 12(5):677-682

[4] Shi Xiaoping, Wang Xu. Nonlinear attitude controller design based on variable structure control with sliding mode[C]//Proceedings of the 3rd IEEE World Congress on Intelligent Control and Automation. Hefei:[s. n.], 2000:3017-3020

[5] Song Wenlong, Liu Yaqiu, Hu Qinglei. Spacecraft vibration suppression during attitude maneuver using PWPF modulated input component commands[C]//IEEE World Congress on Mechatronics and Automation. Niagara Falls, Canada:[s. n.],2005:493-498

(下转第 1192 页)