

人机控制系统中操纵者两级控制模型

王 磊 孔祥利
(西安交通大学机械工程系)

摘要 本文应用模糊理论和人工智能技术,提出和建立了一种操纵者两级控制模型.该模型由上层协调级和下层运行控制级组成,分别用于描述人的监控、协调及其它智能性活动和人的控制行为(技能性活动).

关键词: 人机系统;人工智能;最优控制;操纵者模型;监控

1. 引言

以控制理论为基础所建立的操纵者模型,一般只能描述人以某种确定的控制模式进行工作的低层次行为特性(技能性活动),而不能反映出人的高层次行为特性(智能性活动).如何建立一个合适的、有效的模型来全面描述人在复杂系统中所表现出来的特性,目前已成为人机系统研究领域所面临的一个新课题.

本文基于分级控制概念、人工智能方法和模糊理论^[1,2,9],并结合操纵者最优控制模型^[4],建立了操纵者两级控制模型.该模型已成功地应用于对某高炮半自动防空跟踪火控系统整体性能的分析.模型所给出的跟踪误差均值和均方差的预报值与实验结果能很好地吻合.

2. 模型的建立

两级控制模型的建立,是假定熟练的操纵者以(次)最优控制方式对系统进行控制,并通过监测系统运行状态,在较高层次对控制量进行补偿,使整体系统始终工作在最佳状态.图1示出了操纵者两级控制模型的基本结构,其中下层运行控制级由并行(次)最优控制器组成.模型建立过程可简述如下:

设被控系统含有 N 个相互有关联作用的子系统,其中第 i 个子系统的动态特性由下述状态方程描述

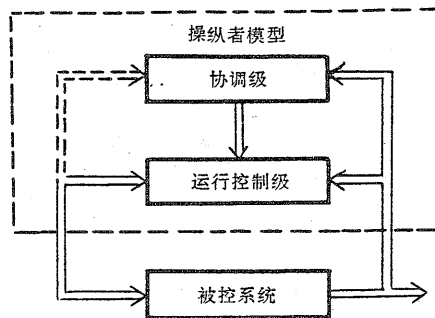


图1 操纵者两级控制模型基本结构图

$$\dot{X}_i(t) = A_i(t)X_i(t) + B_i(t)u_i(t) + G_i\rho_i(t) + W_i(t), \quad (1)$$

$$Y_i(t) = C_i(t)X_i(t) + D_i(t)u_i(t), \quad (2)$$

其中 $W_i(t)$ 是干扰量, $\rho_i(t)$ 是关联输入量, 满足

$$\left. \begin{aligned} \rho_i(t) &= \sum_{j=1}^N H_{ij}X_j(t), \\ H_{ij} &\equiv 0, \quad \text{当 } j = i. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

扩展最优控制模型的建模方法, 则描述操纵者对第 i 子系统的控制量 $u_i(t)$ 可用下式表示

$$\left. \begin{aligned} \tau_{ni}u_i(t) + u_i(t) &= u_{oi}(t) + v_{mi}(t), \\ u_{oi}(t) &= -L_i(t)\hat{X}_i(t). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

图2示出了下层运行控制器第 i 个子系统的基本结构. 将对 N 个子系统分别建立的运行控制器模型组合起来, 就可得到完整的下层模型.

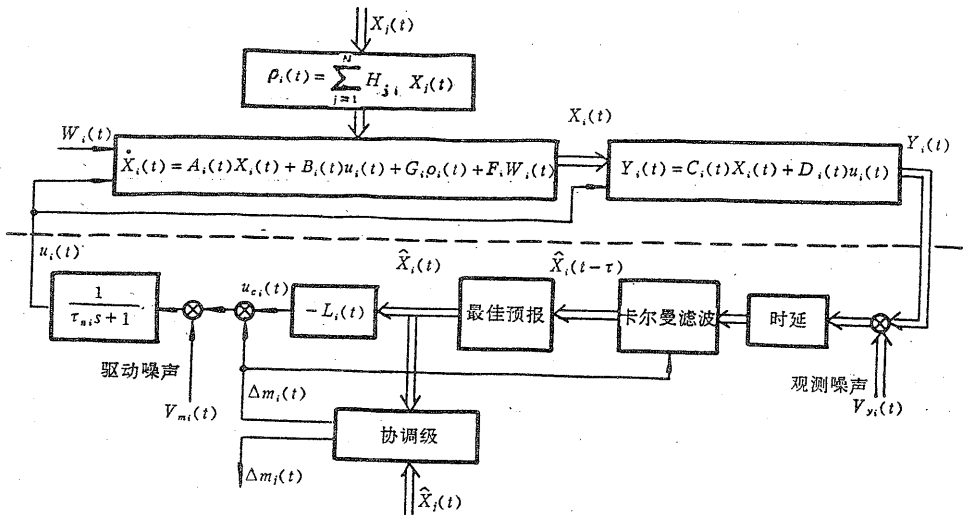


图 2 两级控制模型下层运行控制级结构图

值得指出的是, 下层运行控制级的控制模式可以是多种多样的. 控制模式间的转换由上层协调级完成, 这种多模式控制形式可用于描述人所具有的灵活多变的控制特性.

模型的上层协调级所完成的任务内容需根据具体问题而定. 对于跟踪控制问题, 我们假定协调级根据系统跟踪误差的大小, 通过把一定的补偿量叠加在下层级发出的控制量上来实现监控、协调任务. 基于这一假设, 则第 i 子系统的控制量可表示为

$$u_{oi}(t) = -L_i(t)\hat{X}_i(t) + \Delta m_i(t), \quad (5)$$

式中 $\Delta m_i(t)$ 是协调级发出的补偿控制量, 它是根据跟踪误差 $e_i(t)$ 的大小来确定的.

假设协调级对 $e_i(t)$ 的判断用“大、中、小”三个等级的模糊概念来区分, 并选择两个阈值参数 E_1 和 E_2 ($0 < E_1 < E_2$) 来划分. 由此, 设定协调级的补偿方式分为: 方式1——无补偿; 方式2——有补偿; 方式3——限量补偿.

方式1是指当误差为“小”时 ($|e_i(t)| \leq E_1$), 协调级无需进行补偿, 此时 $\Delta m_i(t) = 0$. 方式2是指当误差为“中”时 ($E_1 < |e_i(t)| \leq E_2$), 协调级要给予下层运行级一定的补偿, 其补偿量的取值与误差有关. 方式3是指当误差为“大”时 ($|e_i(t)| > E_2$), 协调级需给予较大

的补偿。但为避免因补偿过大而造成系统平稳性变差，补偿量必须限定在一定的范围内，因此称为限量补偿。在这种条件下， $\Delta m_i(t) = \Delta m_{\max}$ ($\Delta m_{\max}$ 是补偿量的最大允许值)。

当协调级工作在方式1或方式3时，可直接确定补偿量。而在方式2条件下，则是采用模糊控制方法来确定补偿量的。这首先是要进行精确量的模糊量化。考虑到在方式2条件下， $e_i(t)$ 是在 $[-E_2, -E_1]$ 和 $[+E_1, +E_2]$ 两个区间内变化，不便直接采用已有的量化方法。为此我们先把 $e_i(t)$ 按下式进行变换

$$e_i^*(t) = e_i(t) = \text{sign}[e_i(t)] \cdot E_1, \quad E_1 < |e_i(t)| \leq E_2. \quad (6)$$

这样就可把在 $[-E_2, -E_1]$ 和 $[+E_1, +E_2]$ 两个区间内变化的 $e_i(t)$ 转换成在 $[-E_m, +E_m]$ 区间内变化的 $e_i^*(t)$ ($E_m = E_2 - E_1$)，然后按已有量化方法将 $e_i^*(t)$ 分若干档，每一档对应一模糊子集 $\tilde{E}^*$ 。本文将 $e_i^*(t)$ 所对应的语言变量分为8档，如表1所示。此对应把 $e_i^*(t)$ 分为8级，分别以 $-3, -2, -1, -0, +0, +1, +2, +3$ 表示。由此得出误差 $e_i^*(t)$ 模糊集合的论域 $\tilde{E}$ 为

$$\tilde{E} = \{-3, -2, -1, -0, +0, +1, +2, +3\}.$$

表1 误差 $e_i^*(t)$ 的档次划分

档次	1	2	3	4	5	6	7	8
语言	负大	负中	负小	负零	正零	正小	正中	正大
变量	(NL)	(NM)	(NS)	(NO)	(PO)	(PS)	(PM)	(PL)

注：N—负；P—正；O—零；S—小；M—中；L—大。

经过上述模糊量化后，便可求取模糊集合隶属函数。根据人对事物作出的判断往往遵循正态分布原则^[3]，我们选用下面正态型函数

$$\mu_j(Y_o) = \exp[-(Y_o - a_j)^2 / \sigma_j^2] \quad (7)$$

来描述隶属度问题。上式中 Y_o 表示论域 $\tilde{E}$ 中的某一元素； $j=L, M, S, O$ 分别表示“大、中、小、零”。

通过选择适当的均值 a_j 和方差 σ_j ，便可得到 $e_i^*(t)$ 量化后各档各级的隶属度值。

对补偿控制量也进行了量化和隶属度的求取。我们把 $\Delta m_i(t)$ 分为7档11级，每档对应于模糊子集 $\tilde{M}^*$ 。所得到的补偿量的模糊集合论域 $\tilde{M}$ 为 $\tilde{M} = \{-5, -4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4, +5\}$ 。

假设操纵者的控制输出量的方向与误差信号的正负性是相一致的（此假设在一般人机控制系统中是成立的），则 $\Delta m_i(t)$ 与 $e_i^*(t)$ 之间的关系可由下面的产生式规则表示

```

if  $e_i^* = (PL)_o$  then  $\Delta m_i = (PL)_m$ 
if  $e_i^* = (PM)_o$  then  $\Delta m_i = (PM)_m$ 
if  $e_i^* = (PS)_o$  then  $\Delta m_i = (PS)_m$ 
if  $e_i^* = (PO)_o$  then  $\Delta m_i = (O)_m$ 
if  $e_i^* = (NL)_o$  then  $\Delta m_i = (NL)_m$ 
if  $e_i^* = (NM)_o$  then  $\Delta m_i = (NM)_m$ 
if  $e_i^* = (NS)_o$  then  $\Delta m_i = (NS)_m$ 
if  $e_i^* = (NO)_o$  then  $\Delta m_i = (O)_m$ 

```

上述这些语言控制规则是多级条件语句,是笛卡尔乘积 $\tilde{E} \times \tilde{M}$ 的一个模糊子集 $\tilde{R}$, 可根据 $e_i^*(t)$ 和 $\Delta m_i(t)$ 的隶属度值与模糊运算规则求出。

有了模糊关系 $\tilde{R}$, 依据 e_i^* 所对应的模糊子集 $\tilde{E}^*$, 运用合成运算法, 便可求出 Δm_i 所对应的模糊子集 $\tilde{M}^*$, 然后按选取隶属函数最大值的原则, 确定相应的补偿控制量级数, 最后按下式

$$\Delta m_i = m_{\max} \cdot K_m \quad (8)$$

导出协调级在方式 2 工作条件下所发出的补偿控制量 $\Delta m_i(t)$ 。

在式 (8) 中, $m_{\max}$ 表示模糊子集 $\tilde{M}^*$ 中隶属函数最大元素所对应的级数; K_m 是比例因子。

由于补偿量最大允许值 $\Delta m_{\max}$ 对应于 $\tilde{M}$ 中的元素 5, 故取 $K_m = \Delta m_{\max}/5$ 。

由于运行控制级对系统状态变量的滤波和预报过程受控制量的影响, 因此补偿控制量还要作为变量, 反馈给运行控制级中的卡尔曼滤波器, 参见图 2。

模型协调级发出补偿控制量的过程可由一正向推理树描述, 如图 3 所示。由协调级建模过程可知, 有三个特定参数, 即 E_1 , E_2 和 $\Delta m_{\max}$ 。在仿真过程中, 这三个参数应根据具体所研究的系统结构和特点进行选取, 使模型结果与实验结果相匹配。

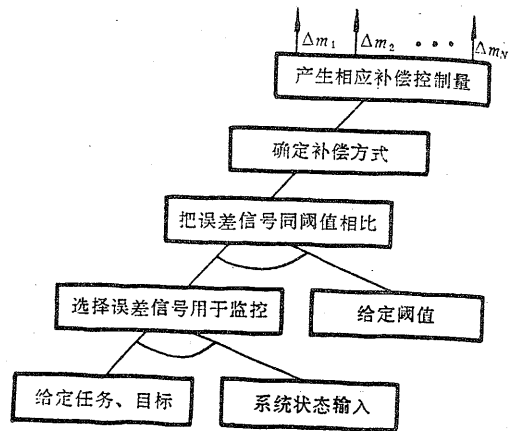


图 3 协调级正向推理树框图

3. 模型应用

应用所提出和建立的操纵者两级控制模型, 对某高炮半自动防空跟踪火控系统整体性能进行了分析。该跟踪系统是一个两自由度具有相互关联作用的非线性时变系统。有关该跟踪系统的动态分析及状态方程建立过程的详细讨论在文献 [5] 中已做介绍, 本文不再赘述。

模型下层运行控制级中有关人的参数取典型值^[6], 即人的时延参数取 0.25 秒。人神经肌肉系统滞后参数取 0.1 秒。协调级参数根据系统实际特点, 取 $E_1 = 1.5$ 毫弧度, $E_2 = 5$ 毫弧度, $\Delta m_{\max} = 1.5$ 千克·牛顿。

对几种典型目标飞行航路进行了仿真和实验。为了获得平均结果, 要求炮手对每一航路至少跟踪 10 次。对同一目标航路, 实验的跟踪误差均值和均方差按下式计算

$$\bar{e}_j(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_{ji}(t), \quad (9)$$

$$\bar{\sigma}_j(t) = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_{ji}^2(t) - \bar{e}_j^2(t) \right]^{1/2}, \quad (10)$$

式中 $e_{ji}(t)$ 表示第 i 次跟踪过程中, 在 t 时刻的跟踪误差 ($j=1$ 时, 表示高低子系统; $j=2$ 时, 表示方位子系统), $\bar{\sigma}_j$ 表示均方差。

图 4 和图 5 给出了对某一航路的仿真和实验结果。图 4 示出的是跟踪误差的均值。为使

于比较,图中还同时给出了并行(次)最优控制模型的仿真结果.图5示出的是跟踪误差的均方差.

由仿真和实验结果的比较可知,两级控制模型所给出的跟踪误差均值要比并行(次)最优控制模型更逼近于实验结果.这说明用两级控制模型比并行(次)最优控制模型能更准确地描述炮手的操作特性.

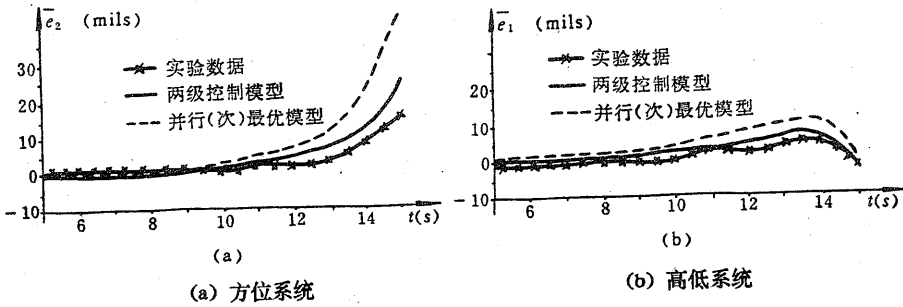


图4 跟踪误差均值

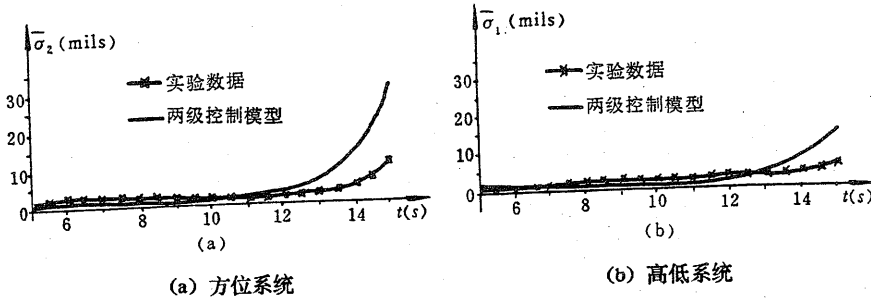


图5 跟踪误差的均方差

这里要说明的是,模型下层级采用并行(次)最优控制模式后,可以把描述整体系统动态特性的状态方程降阶,化为低阶状态方程组.这样,在对两自由度以上的人机控制系统进行分析时,采用两级控制模型要比最优控制模型节省大量计算机仿真时间.对本文所研究的高炮跟踪系统,若用最优控制模型进行分析,则系统动态特性由一组阶数为12的状态方程来描述,而前者比后者能节省约87.5%的计算机仿真时间.

有关操纵者两级控制模型的详细推导及模型应用情况,请读者参阅文献[7].

4. 结 论

1) 应用模糊理论和人工智能技术建立的操纵者两级控制模型,可以有效地描述控制系统中人的智能性活动.采用“if () then ()”的规则形式来描述模型协调级的特征,可以使模型在描述人的智能性活动方面有很大的灵活性.用在不同方面时,可根据具体问题对协调级中的规则进行修改和扩充.

2) 这种模型结构,为研究人的监控、协调、决策、规划等特性提供了一种可行的分析方法。

3) 模型下层运行级控制模式的多样性,使两级控制模型不仅适用于对具有同一类型控制任务的多回路人机控制系统进行分析,而且还可以推广到对具有不同类型控制任务的人机控制系统(例如某些连续性控制任务和离散性控制任务并存的人机控制系统)进行分析。

4) 对某高炮半自动防空跟踪火控系统的仿真和实验结果的分析表明,两级控制模型在整个跟踪过程中所给出的系统跟踪误差均值比并行(次)最优控制模型更逼近于实验结果。

5) 应用两级控制模型分析高炮系统整体性能,比用最优控制模型节省87.5%的计算机仿真时间。

参 考 文 献

- [1] (英) 辛格著,李教安译,大系统的动态递阶控制. 科学出版社,北京,(1983).
- [2] 傅京孙等著,人工智能及其应用,清华大学出版社,北京,(1987),277—288.
- [3] 王学慧等编著,微机模糊控制理论及其应用,电子工业出版社,北京,(1987).
- [4] Kleirman, D. L., S. Baron, and W. H. Levison, An Optimal Control Model of Human Response Part I: Theory and Validation, *Automatica*, 6, (1971), 357—369.
- [5] 孔祥利,人机跟踪系统研究:人一炮防空跟踪系统的动态分析及操作训练系统,博士学位论文,西安交通大学,(1985).
- [6] Sheridan, T. B. and W. R. Ferrell, Man—Machine Systems, Information, Control, and Decision Model of Human Performance, MIT Press, (1981), 207—258.
- [7] 王磊,人机控制系统动态特性分析与评价方法及其应用的研究,博士学位论文,西安交通大学,(1988).

Two—level Control Model for Human Operator in Man—machine Control Systems

Wang Lei, Kong Xiangli

(Department of Mechanical Engineering, Xian jiaotong University)

Abstract: Based on Fuzzy theory and AI technique, a twolevel control model for human operator is proposed and developed. The model consists of upper coordinating level and lower controlling level, describing human's monitoring, coordinating behaviors and other intelligent activities and human's control behavior (skill activities), respectively.

Key words: man—machine systems; artificial intelligence; optimal control; operator model; supervision and control