

研究简报

人机系统最优预见补偿跟踪控制研究

于黎明 王占林

(北京航空航天大学自动控制系 北京 100083) (E-mail: yliming@sohu.com)

关键词 人机控制, 最优控制, 预见控制.

OPTIMAL PREVIEW COMPENSATIVE TRACKING CONTROL FOR PILOT-VEHICLE SYSTEMS

YU Li-Ming WANG Zhan-Lin

(Dept. of Automatic Control, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

(E-mail: yliming@soku.com)

Key words Manual control, optimal control, preview control.

1 引言

预见控制理论是最优跟踪控制问题的新的出发点,其有效性在机器人、数字机床等路径控制中得到证实^[1]. 本文将预见控制应用到人机控制系统.

人具有“先前看”的能力,尤其是训练有素的驾驶员具有积极利用未来目标信号提高跟踪品质的预见操纵行为. 以驾驶员-飞机目标跟踪控制系统为例,在人的最优控制模型(OCM)基础上,通过目标信息的预见显示,建立人的最优预见控制模型(OPCM). 应用数字最优预见控制理论^[2],对信号发生器产生的目标信号进行预见跟踪控制.

2 驾驶员最优预见控制模型(OPCM)

2.1 数字最优预见控制

最优预见跟踪控制系统的结构如图1所示,闭环反馈结构独立于预见信息而存在,而预见结构却依赖于闭环系统的动态特性. 这种预见前馈属于零点配置,并不改变系统的闭环极点配置,说明预见信息的引入不改变系统的闭环动态结构但能提高系统的跟踪品质,并且保证系统的稳定性和鲁棒性.

2.2 驾驶员最优预见控制模型(OPCM)

基于 Kleinman 的驾驶员最优控制模型(OCM)^[3],引入目标信号的有限未来信息,应

用数字最优预见控制理论^[2],建立驾驶员最优预见控制模型(OPCM).几点说明:1)由于OCM是连续系统模型,需对驾驶员处理信息和实施操纵的行为离散化;2)由于驾驶员生理和心理所限,人有观测延迟和观测噪声,操纵时有神经肌肉动作延迟和肌肉噪声,导致人脑产生的最优控制输入经肌肉环节操纵延迟而成为次最优控制输入;3)驾驶员通过显示器提取被控对象的状态信息和目标信号,需要构造观测器进行系统全状态估计才能实现最优反馈;4)性能指标既对代表体力特征的控制输入加权也对代表精力消耗的控制输入的速率信号加权,其值大小可转化成驾驶员操纵品质评价等级指标.为化简OCM,把观测延迟和操纵延迟合并一处作用于神经肌肉环节,将肌肉噪声和观测噪声作为干扰信号处理.OPCM原理图如图2所示.

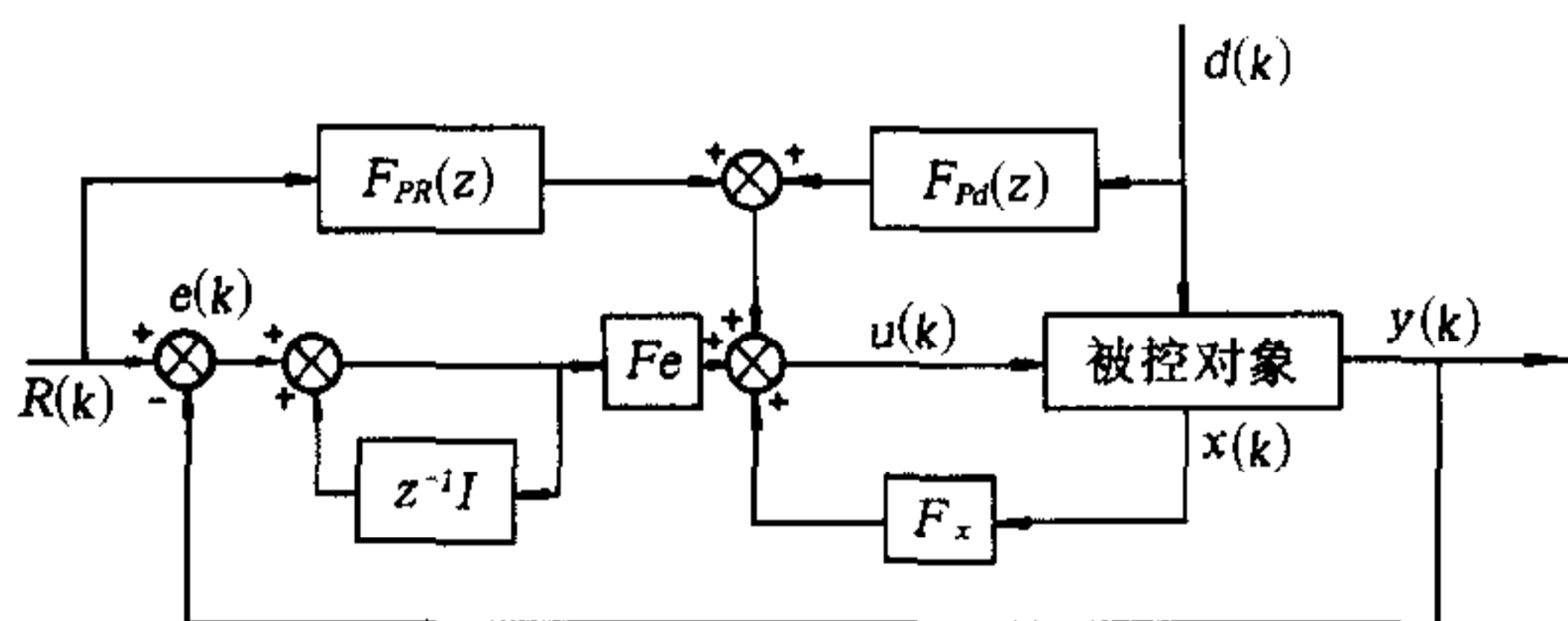


图1 最优预见跟踪控制系统结构图

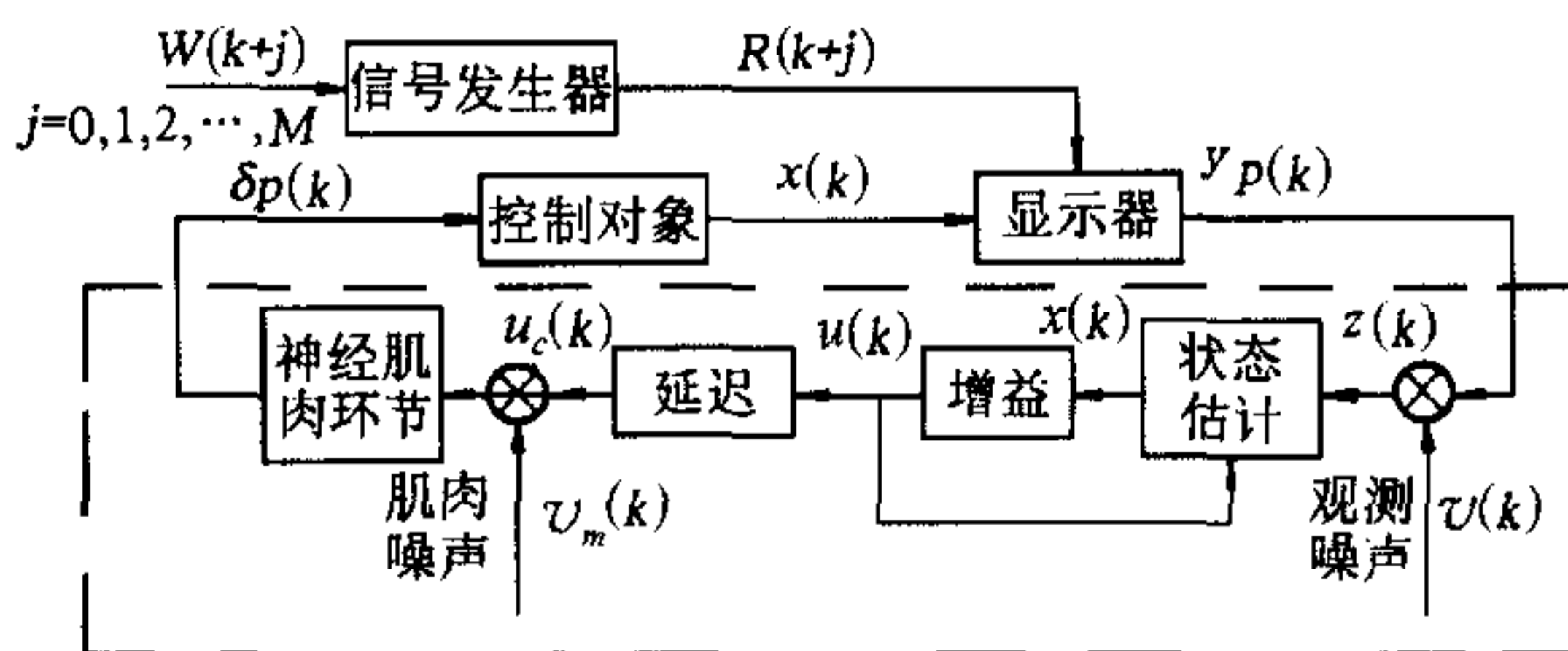


图2 简化驾驶员最优预见控制模型

人机系统状态方程为

$$x(k + 1) = Ax(k) + B\delta_p(k) + EV(k), \tag{1}$$

δ_p 是人的控制输入, $V(k) = [v_m(k), v(k)]^T$ 是肌肉噪声和观测噪声序列, 作为干扰源.

驾驶员的神经肌肉环节具有一阶滞后作用, 即

$$\tau_n \dot{\delta}_p(k) + \delta_p(k) = u(k) + v_m(k), \tag{2}$$

$u(k)$ 是人脑产生对系统全状态反馈的最优输入, τ_n 是神经肌肉时间常数, 典型值为 $\tau_n = 0.1$ 秒. 考虑观测延迟 τ_p 影响的后移, 调整 τ_n . 操纵输入速率 $\dot{\delta}_p$ 采用一阶向前差分的形式来描述, 即令 $\mu(k) = \dot{\delta}_p(k) \approx (\delta_p(k+1) - \delta_p(k)) / \Delta t$ (Δt 是采样时间), 故有

$$\delta_p(k + 1) = \delta_p(k) + \Delta t \mu(k). \tag{3}$$

驾驶员通过显示器观测系统的状态 $x(k)$ 和目标信号 $R(k)$, 观测方程可以描述成

$$y_p(k) = C_1 x(k) + \sum_{j=0}^M C_2(j) R(k + j) + v(k). \tag{4}$$

取对目标值和干扰预见长度相同, 预见步长为 M , 性能指标函数含有反映驾驶员操纵负担的控制速率 $\mu(k)$ 加权项

$$J = \sum_{k=-M+1}^{\infty} ([x^T(k), \delta_p^T(k)] Q [x(k), \delta_p(k)]' + \mu(k)^T H \mu(k)), \tag{5}$$

J 和驾驶员对操纵品质主观评价等级 (PR) 的内在联系为 $PR = 2.5 \ln(10J_p) + 0.3$.

式(1), (3)~(5)存在最优解

$$\mu(k) = F_x \hat{x}(k) + F_\delta \delta_p(k) + \sum_{j=0}^M F_{1R}(j) R(k + j) + \sum_{j=0}^M F_{1d}(j) v_m(k + j), \tag{6}$$

其中 $\hat{x}(k)$ 是系统状态估计. 驾驶员由显示器提取的信号通过最小方差的离散 Kalman 滤波器得到状态估计过程如下:

$$\hat{x}(k + 1) = A\hat{x}(k) + B\delta_p(k) + K[Z(k) - D\hat{x}(k)], \tag{7}$$

其中 $Z(k) = Dx(k) + v(k)$ 是观测方程, $v(k)$ 是观测噪声, K 为滤波器增益.

3 仿真验证

以飞机理想模型 $1/s^2$ 为例进行人机预见跟踪操纵特性仿真. 目标信号由白噪声经过频宽 ω_s 和阻尼 ξ_s 的二阶信号发生器产生. 由图3可见预见信息的增加使信号跟踪的延迟时间明显减小, 并且实现了良好的平滑跟踪, 预见信息补偿了驾驶员等效操纵延迟. 由表1可见有预见驾驶员评分比没有预见显著提高, 在预见长度 0.4~0.7 秒之间预见控制达到最佳状态. 这说明对动态响应比较快的人机系统只需要较近的未来信息实施有限预见控制即可.

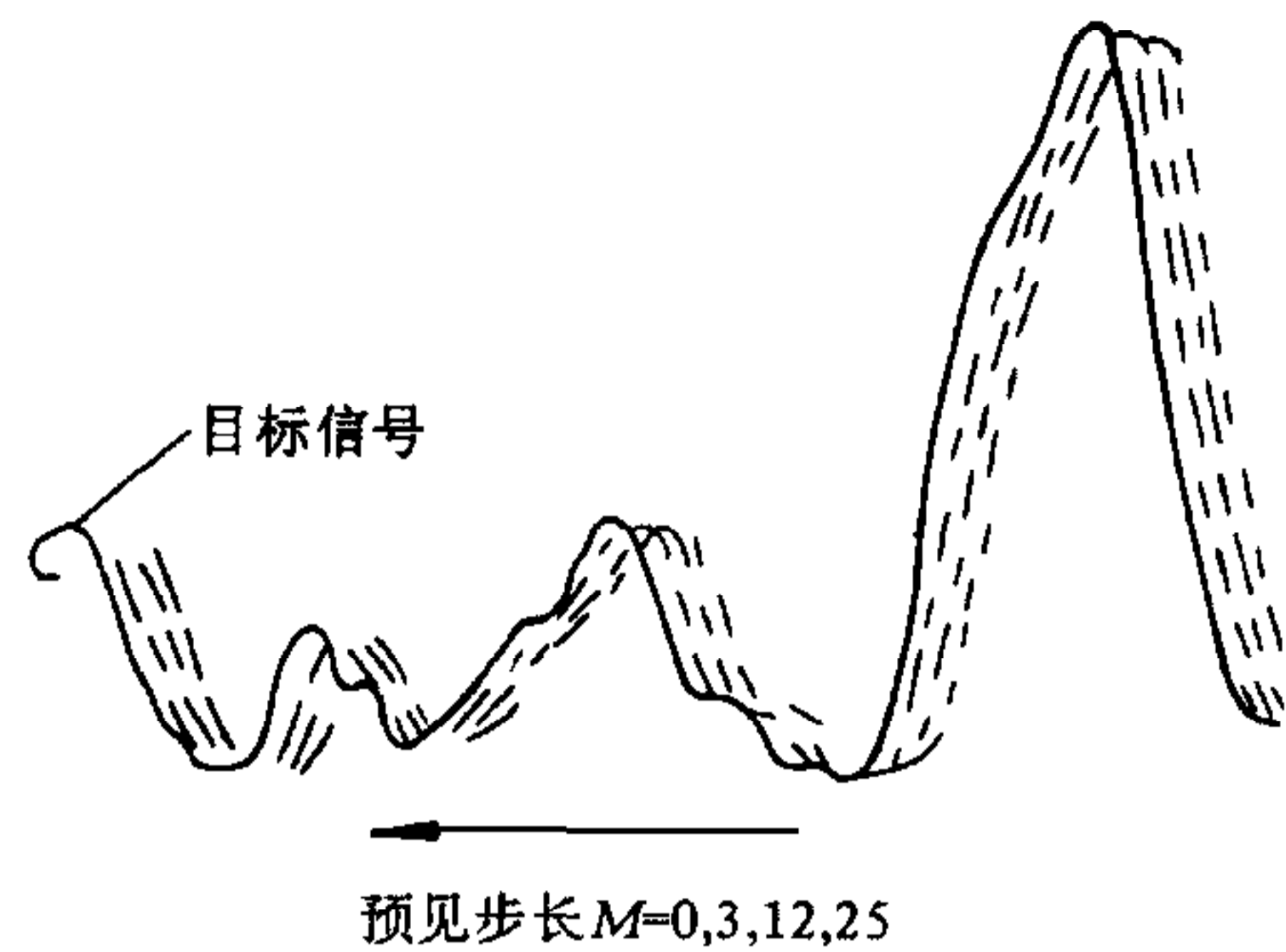


图3 人机系统预见跟踪控制的时间响应仿真曲线

表1 人机系统对随机指令预见跟踪的品质指标比较

预见步长 M_R	跟踪误差 e	控制输入 U_p	性能指标 J	品质评分 PR
$M=0$	1.020	1.027	1.547	7.147
$M=3$	0.709	1.009	0.787	5.457
$M=12$	0.253	0.853	0.502	3.481
$M=18$	0.182	0.623	0.242	2.504
$M=25$	0.178	0.630	0.227	2.345
$M=40$	0.177	0.632	0.227	2.345

4 结论

利用人对目标信号的预见能力, 进行人机最优预见跟踪控制, 跟踪误差减小, 控制输入变得平滑, 品质评价提高. 预见信息的引入有效地补偿了驾驶员操纵时延和自身干扰.

参 考 文 献

- 1 Katayama T *et al.* Design of an optimal controller for a discrete-time system subject to previewable demand. *Int. J. Control*, 1985, 41(3): 677~699
- 2 土谷武士, 江上正. 最新自动控制技术——数字预见控制. 北京: 科学技术出版社, 1994.
- 3 Kleinman D L. Optimal linear control for system with time-delay and observation noise. *IEEE Trans. Autom. Control*, 1969, AC-14: 524~527

于黎明 1970年生, 现任职北京航空航天大学自动控制系讲师, 在职博士. 研究方向为驾驶员控制模型、人机闭环优化设计.

王占林 1944年生, 现任职北京航空航天大学自动控制系博士生导师. 研究方向为驾驶员-飞机操纵系统闭环特性优化设计、辅助驾驶员操纵的控制系统和显示系统的研究.