

离散时间域人机系统控制与显示的最优协调性合成设计

张红宇

(北京航空航天大学自动控制系·北京, 100083)

摘要: 本文以简化的驾驶员最优控制模型为基础, 将最优协调性合成技术应用于人机控制系统, 开发出离散时间域的数值迭代算法, 提出了协调驾驶员、控制器和显示器的解析设计方案. 实例表明, 算法稳定收敛, 方案能显著减轻操纵负荷, 结果可靠.

关键词: 人机控制系统; 驾驶员最优控制模型; 最优协调性合成设计; 信号加速显示

1 前言

对于飞行操纵等人机控制系统, 驾驶员主要通过显示器来接受操纵信号, 显示规律设置不当会增加操纵负荷造成人为失误. 为此, 一般采用信号加速显示来辅助驾驶员操纵, 但加速规律的设计一直是多年来尚未妥善解决的课题. 本文以定性分析为基础应用简化的驾驶员最优控制模型(ROCM), 根据最优协调性合成设计(OCS)方法开发出满意的解决方案. 本文研究离散时间域的线性时不变稳态随机控制对象, 符合人机控制的准线性概念和传统研究方式.

2 定性分析

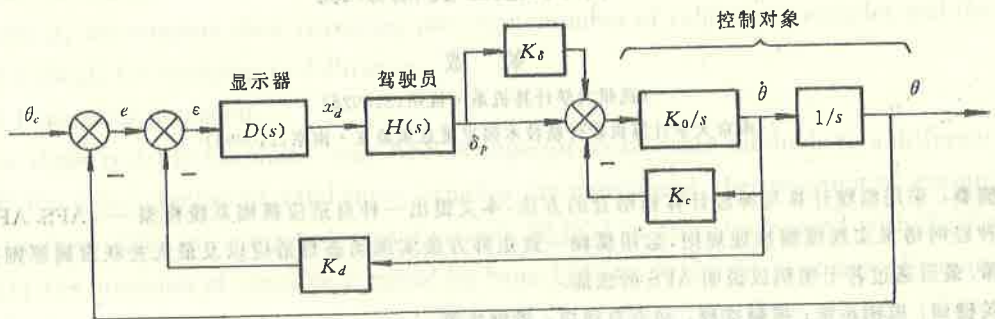


图 1 典型的补偿跟踪控制系统

考虑如图 1 所示的控制系统. 驾驶员控制临界稳定对象 K_0/s^2 需要付出较大的超前补偿, 导致操纵品质恶化和主观评分降低. 为此, 分别用增益 K_d, K_c 和 K_δ 进行显示器和控制器信号的加速反馈以及补偿驾驶员增益的衰减. 令 $D(s) = 1$, 驾驶员面对的控制对象 ($\delta_p \rightarrow x_d$) 为

$$\frac{x_d(s)}{\delta_p(s)} = \frac{K_0(K_\delta + 1)(K_d s + 1)}{s(s + K_0 K_c)} \quad (1)$$

当仅有显示器合成 ($K_c = K_\delta = 0$) 时, 误差信号 e 被修正成 ϵ , 在频率高于 $1/K_d$ 的范围内人机开环表现出 k/s 的特性. 根据交叉频率模型的准则^[1], 人机系统处于最佳状态, $(K_d s + 1)$ 环节提供超前补偿. 当仅有控制器合成 ($K_d = 0$) 时, 误差信号 e 虽然不变, 但在频率低于 $K_0 K_c$ 的范围内人机开环表现得很象 k/s , $(s + K_0 K_c)$ 环节提供稳定裕度. 显然, 当既有显示器合成又有控制器合成时, 只要满足 $K_0 K_c = 1/K_d$, 控制系统才绝对表现出最佳状态, 但是完全满足该要求是

不可能的,显示器加速作用和控制器合成作用互相排斥,存在着 K_d , K_c 和 K_s 的最优协调匹配。

3 合成设计

3.1 问题描述

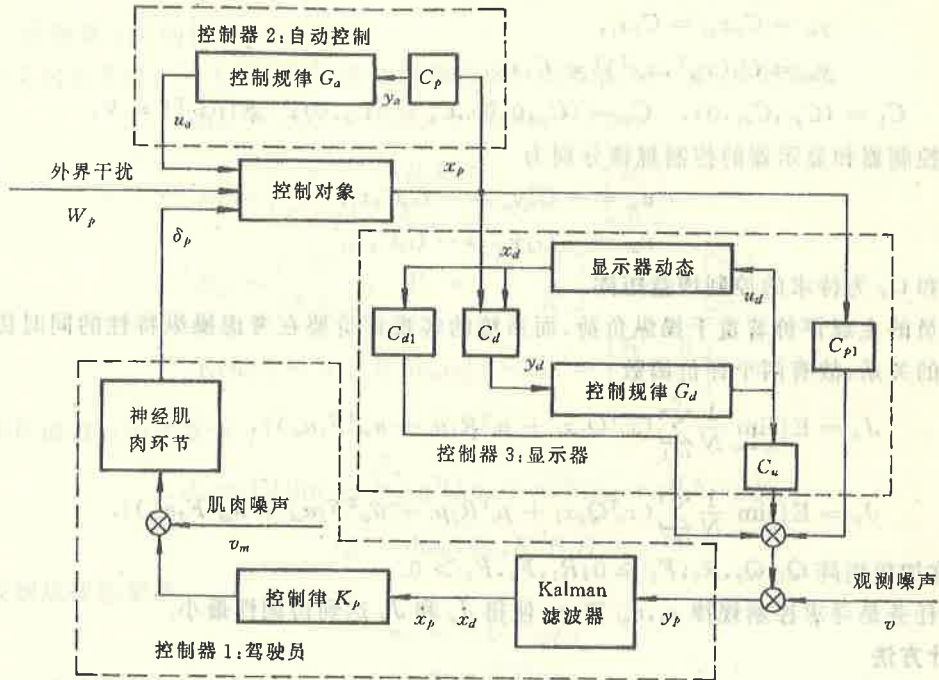


图 2 合成设计原理图

人机系统一般包含驾驶员、自动控制器和显示器等三种控制作用,如图 2 所示.其中,驾驶员与显示器是串行的,两者又与控制器并行.控制对象的动态为 (A_p, B_p) , 受方差为 W_p 的外界白噪声干扰,显示器动态为 (A_d, B_d) . 驾驶员相当于随机控制器,观测和肌肉动态分别受方差为 V 和 V_m 的白噪声影响,其滤波估计与最优控制过程可以用 ROCM 方法来描述^[2]. 驾驶员的主观评分(PR) 和最优控制的评价函数之间近似满足:

$$PR = 2.5 \ln(10J_p) + 0.3. \quad (2)$$

将各种动态组合成增广系统,有状态方程

$$x_{i+1} = Ax_i + B_1\mu_i + B_2u_{ai} + B_3u_{di} + \Gamma w_i. \quad (3)$$

其中

$$x = \begin{bmatrix} x_p \\ x_d \\ \delta_p \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} A_p & 0 & B_p \\ 0 & A_d & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta t \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} B_p \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$B_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ B_d \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \Gamma = \begin{bmatrix} \Gamma_p & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \Delta t \end{bmatrix}, \quad w = \begin{bmatrix} w_p \\ v_m \end{bmatrix},$$

且 $E\{w_i\} = 0$, $E\{w_i w_i^T\} = W = \begin{bmatrix} W_p & 0 \\ 0 & V_m \end{bmatrix} \succ 0$,

Δt 为采样步长, $\mu_i \approx \delta_{pi}$ 代表操纵负荷。

控制器的反馈信号来自状态 x_p , 显示器的控制信号来自状态 x_p 和 x_d , 不允许 x_d 直接作用于控制对象. 为简便起见, 假设控制器与显示器不再受噪声影响. 观测信号是系统状态和加速规律等的组合形式, 状态观测方程分别为

$$y_{pi} = C_{p1}x_{pi} + C_{d1}x_{di} + C_u u_{di} + v_i = C_1 x_i + C_u u_{di} + v_i, \quad (4)$$

$$y_{ai} = C_p x_{pi} = C_2 x_i, \quad (5)$$

$$y_{di} = C_d (x_{pi}^T, x_{di}^T)^T = C_3 x_i. \quad (6)$$

其中 $C_1 = (C_{p1}, C_{d1}, 0)$, $C_2 = (C_p, 0, 0)$, $C_3 = (C_d, 0)$, $E\{v_i v_i^T\} = V$.

自动控制器和显示器的控制规律分别为

$$u_{ai} = -G_a y_{ai} = -G_a C_2 x_i, \quad (7)$$

$$u_{di} = -G_d y_{di} = -G_d C_3 x_i. \quad (8)$$

其中, G_a 和 G_d 为待求的控制增益矩阵.

驾驶员的主观评价着重于操纵负荷, 而系统的客观评价要在考虑操纵特性的同时协调控制与显示的关系, 故有两个评价函数

$$J_p = E\left\{\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^T Q_1 x_i + \mu_i^T R_1 \mu_i + u_{ai}^T F_1 u_{ai})\right\}, \quad (9)$$

$$J_d = E\left\{\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^T Q_2 x_i + \mu_i^T R_2 \mu_i + u_{ai}^T F_2 u_{ai} + u_{di}^T F_3 u_{di})\right\}. \quad (10)$$

其中, 对称加权矩阵 $Q_1, Q_2, R_2, F_1 \geq 0; R_1, F_2, F_3 > 0$.

设计任务是寻求控制规律 μ_i, u_{ai} 和 u_{di} 使得 J_p 和 J_d 达到协调性最小.

3.2 设计方法

上述过程构成多控制器的非零和动态决策问题, 可以应用 OCS 方法求取其 Nash 平衡解^[3].

1) 控制器 1 的设计:

将(7)和(8)式代入(3)式, 得到动态系统

$$x_{i+1} = A_{aug} x_i + B_1 \mu_i + \Gamma w_i. \quad (11)$$

其中

$$A_{aug} = A - B_2 G_a C_2 - B_3 G_d C_3.$$

评价函数(9)式变为

$$J_p = E\left\{\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x_i^T (Q_1 + C_2^T G_a^T F_1 G_a C_2) x_i + \mu_i^T R_1 \mu_i]\right\}. \quad (12)$$

LQG 调节器(11), (12)和(4)式有最优控制解

$$\mu_i = -K_p \hat{x}_i, \quad (13)$$

$$K_p = (R_1 + B_1^T P_c B_1)^{-1} B_1^T P_c A_{aug}, \quad (14)$$

$$P_c = A_{aug}^T P_c A_{aug} + Q_1 + C_2^T G_a^T F_1 G_a C_2 - A_{aug}^T P_c B_1 (R_1 + B_1^T P_c B_1)^{-1} B_1^T P_c A_{aug}. \quad (15)$$

令 $K_p = (K_{pp}, K_{pd}, K_{pd})$, 驾驶员的神经肌肉时间常数 $\tau_N = 1/K_{pd}$, 可通过权系数 R_1 来调节.

状态的最小方差估计过程为

$$\hat{x}_{i+1} = A_{aug} \hat{x}_i + B_1 \mu_i + K_e [y_{pi} - C_{aug} \hat{x}_i], \quad (16a)$$

或

$$\hat{x}_{i+1} = \tilde{A}_{aug} \hat{x}_i + K_e C_1 x_i + K_e C_u u_{di} + K_e v_i, \quad (16b)$$

$$K_e = A_{aug} P_c C_{aug}^T (V + C_{aug} P_c C_{aug}^T)^{-1}, \quad (17)$$

$$P_e = A_{aug}P_eA_{aug}^T + \Gamma W \Gamma^T - A_{aug}P_eC_{aug}^T(V + C_{aug}P_eC_{aug}^T)^{-1}C_{aug}P_eA_{aug}^T. \quad (18)$$

其中 $\tilde{A}_{aug} = A_{aug} - B_1K_p - K_eC_{aug}, \quad C_{aug} = C_1 - C_uG_dC_3.$

评价函数的封闭表达式为

$$J_p = \text{tr}[P_e\Gamma W \Gamma^T] + \text{tr}[P_eK_p^T(R_1 + B_1^T P_e B_1)K_p]. \quad (19)$$

2) 控制器 2,3 的设计:

定义状态变量 $q = (x^T, \hat{x}^T)^T$, 用(13)和(16b)式来增广(3)式, 得到系统

$$q_{i+1} = A_q q_i + B_{q2} u_{ai} + B_{q3} u_{di} + \Gamma_q w_{qi}. \quad (20)$$

其中

$$A_q = \begin{bmatrix} A & -B_1K_p \\ K_eC_1 & \tilde{A}_{aug} \end{bmatrix}, \quad B_{q2} = \begin{bmatrix} B_2 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$B_{q3} = \begin{bmatrix} B_3 \\ K_eC_u \end{bmatrix}, \quad \Gamma_q = \begin{bmatrix} \Gamma & 0 \\ 0 & K_e \end{bmatrix}, \quad w_q = \begin{bmatrix} w \\ v \end{bmatrix},$$

且

$$E\{w_{qi}\} = 0, \quad E\{w_{qi}w_{qi}^T\} = w_q = \begin{bmatrix} W & 0 \\ 0 & V \end{bmatrix} > 0.$$

评价函数(10)式变为

$$J_d = E\left\{\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [q_i^T Q_q q_i + u_{ai}^T F_2 u_{ai} + u_{di}^T F_3 u_{di}]\right\}. \quad (21)$$

其中

$$Q_q = \text{diag}(Q_2, K_p^T R_2 K_p).$$

控制规律也变成

$$u_{ai} = -G_a C_{q2} q_i, \quad (22)$$

$$u_{di} = -G_d C_{q3} q_i. \quad (23)$$

其中, $C_{q2} = (C_2, 0), C_{q3} = (C_3, 0)$. 在寻找控制规律 u_{ai} 和 u_{di} 时, 可以根据原始增益 G_a 和 G_d 来固定矩阵 \tilde{A}_{aug} , 认为它不再变化.

根据双输出反馈控制合成方法^[3], 最优解存在的必要条件为

$$G_a = (F_2 + B_{q2}^T P B_{q2})^{-1} B_{q2}^T P A_{qa} S C_{q2}^T (C_{q2} S C_{q2}^T)^{-1}, \quad (24)$$

$$G_d = (F_3 + B_{q3}^T P B_{q3})^{-1} B_{q3}^T P A_{qd} S C_{q3}^T (C_{q3} S C_{q3}^T)^{-1}. \quad (25)$$

其中

S 和 P 满足

$$S = A_{qc} S A_{qc}^T + \Gamma_q W_q \Gamma_q^T, \quad (26)$$

$$P = A_{qc}^T P A_{qc} + Q_q + C_{q2}^T G_a^T F_2 G_a C_{q2} + C_{q3}^T G_d^T F_3 G_d C_{q3}. \quad (27)$$

其中

$$A_{qc} = A_q - B_{q2} G_a C_{q2} - B_{q3} G_d C_{q3}.$$

评价函数的封闭表达式为

$$J_d = \text{tr}[P \Gamma_q W_q \Gamma_q^T]. \quad (28)$$

可见, 为求取最优增益 (G_a^*, G_d^*) 需要同时求解两个耦合的 Riccati 矩阵方程(15)和(18)以及两个耦合的 Lyapunov 矩阵方程(26)和(27), 该过程需要采用数值迭代方法来完成. 只要满足观测矩阵行满秩、加权矩阵符合要求并与相应的系统矩阵构成可检测对、控制系统用输出反馈可稳定, 则该过程必存在稳定的收敛解.

4 数值迭代

为使结果反映实际操纵情况, 迭代过程以满足驾驶员操纵要求为大循环, 每次迭代均需使用 ROCM 方法, 而以控制和显示规律的计算为小循环给出增益矩阵的数值. 具体步骤如下:

1) 参数初始化: 选择使系统稳定的初始增益矩阵 G_a 和 G_d , 给出合理的时间常数 τ_N , 观测

延迟 τ_p , 初始噪声方差 V_m 和 V 以及外界随机信号的方差 W_p .

2) 驾驶员随机控制器的求解: 根据 ROCM 方法利用 (13) ~ (18) 式设计最优控制器和状态滤波器, 进行观测和肌肉噪声方差的数值迭代, 并由 (19) 式计算驾驶员的评价函数值 J_p .

3) 增益矩阵的数值迭代: 由既定的随机控制器和结构 (G_a, G_d) 设计控制和显示规律.

1° 初始化: 置 $k = 0$, 构造 (20) 式的增广系统.

2° 第 k 次迭代:

① 由 (26) 和 (27) 式求解矩阵 S_k 和 P_k , 由 (28) 式计算评价函数值 J_{dk} ;

② 在 (G_{ak}, G_{dk}) 情况下, 利用矩阵 S_k 和 P_k , 由 (24) 和 (25) 式计算新的增益 G'_{ak} 和 G'_{dk} , 则增益更新的方向为 $\Delta G_a = G'_{ak} - G_{ak}$ 和 $\Delta G_d = G'_{dk} - G_{dk}$;

③ 更新增益矩阵: $G_{ak+1} = G_{ak} + \alpha_1 \Delta G_a$; $G_{dk+1} = G_{dk} + \alpha_2 \Delta G_d$. 其中, α_1 和 α_2 选择得使矩阵 $A_{qck+1} = A_q - B_{q2} G_{ak+1} C_{q2} - B_{q3} G_{dk+1} C_{q3}$ 渐近稳定;

④ 对新的设计结构 (G_{ak+1}, G_{dk+1}) , 由 (27) 式求解矩阵 P_{k+1} , 由 (28) 式计算新的评价函数值 J_{dk+1} ;

⑤ 对于给定的误差限 ϵ_1 , $|J_{dk+1} - J_{dk}| < \epsilon_1$ 是否成立? 是, 则转入 3°; 否, 则置 $k = k + 1$, 转入 2°, 重新计算.

3° 增益迭代终止: $G_a^* = G_{ak+1}$, $G_d^* = G_{dk+1}$, $J_d^* = J_{dk+1}$, 转入 4).

4) 驾驶员随机控制器的更新: 在 (G_a^*, G_d^*) 的情况下, 重复 2) 的工作, 设计更新的随机控制器, 获得新的驾驶员评价函数值 J'_p .

5) 驾驶员在环操纵情况的检查: 对于给定的误差限 ϵ_2 , $|J'_p - J_p| < \epsilon_2$ 是否成立? 是, 则 (G_a^*, G_d^*) 为所要求的最优解, 用 J'_p 由 (2) 式计算 PR 值, 退出; 否, 则置 $G_a = G_a^*$, $G_d = G_d^*$, 转入 3), 重复增益矩阵的迭代计算过程.

算法中的参数 α_1 和 α_2 影响迭代计算的循环次数和动态过程, 需设计成自动收缩形式以确保稳定收敛. 如果 τ_N 值的变化超出了反映驾驶员实际能力的合理范围, 还需调整 R_1 重新进行整个迭代工作, 但这种情况并不多见.

5 设计实例

5.1 实例概况

研究图 1 的补偿跟踪控制任务. 指令信号由成形滤波器 $\theta_c(s)/w_c(s) = 3.67/(s^2 + 3s + 2.25)$ 发生, 噪声方差为 $E\{w_c^2\} = 12$; 控制对象为 $11.7/s^2$; 显示器动态为 $30/(s + 30)$. 输出变量分别为 $y_a = (\dot{\theta}, \delta_p)^T$, $y_d = \dot{\theta}$.

驾驶员的观测变量为 $sy_p = (x_d, \dot{x}_d)^T + v$, 有评价函数 $J_p = E\{\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{di}^2 + g_p \delta_{pi}^2)\}$, 调节参数 g_p 选取 $\tau_N = 0.1s$. 忽略视觉门槛, 对速率信号分配 70% 的注意力, 取观测延迟 $\tau_p = 0.1s$, 取观测和肌肉噪声的信噪比分别为 -20dB 和 -25dB.

闭环控制任务是保持跟踪误差 e 最小, 评价函数为 $J_d = E\{\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (e_i^2 + g_p \delta_{pi}^2 + F_2 u_{di}^2 + F_3 u_{di}^2)\}$. 其中, F_2 和 F_3 作为可调节的自由参数处理.

取采样步长 $\Delta t = 0.05s$ 将系统离散化, 并构造相应的系统矩阵, 待求增益为 $G_a = [K_c, -K_\delta]$ 和 $G_d = K_d$, 以下给出具体的设计结果.

5.2 结果分析

当系统没有任何控制或显示作用合成时, 操纵负荷很重, 跟踪品质极低, 导致较差的 PR

值(接近第Ⅲ级:6.5~10),如表1所示,其中品质指标以时间平均值即rms的形式给出。

当只有显示器合成($F_2 \rightarrow \infty$)时,结果如表2所示.随着 F_3 的减小 K_d 增加,显示作用增强,跟踪误差和操纵负荷单调减小,PR值显著改善(接近第Ⅰ级:1~3.5).但是, K_d 过大会恶化跟踪品质,使显示作用饱和,无法获得进一步改善。

当只有控制器合成($F_2 \rightarrow \infty$)时,结果如表3所示.随着 F_2

的减小 K_c 和 K_b 增加,控制作用增强,跟踪误差和操纵负荷也单调减小.PR值得到更大程度的改善(达到第Ⅰ级).但是, K_c 过高会降低驾驶员的操纵权限,使操纵品质恶化。

表1 无合成设计时的操纵品质

g_p	$e(\text{deg})$	$\delta_p(\text{deg})$	$\dot{\delta}_p(\text{deg/s})$	J_p	PR
0.009	0.896	0.810	5.59	1.09	6.3

表2 只有显示器合成时的设计结果及操纵品质

F_3	K_d	$e(\text{deg})$	$\delta_p(\text{deg})$	$\dot{\delta}_p(\text{deg/s})$	J_p	PR
10	0.029	0.827	0.756	5.20	0.90	5.8
1	0.175	0.629	0.544	3.85	0.46	4.1
0.1	0.251	0.584	0.464	3.40	0.37	3.6
0.01	0.260	0.580	0.455	3.35	0.36	3.5
0.001	0.262	0.580	0.454	3.35	0.36	3.5

表3 只有控制器合成时的设计结果及操纵品质

F_2	K_c	K_b	$e(\text{deg})$	$\delta_p(\text{deg})$	$\dot{\delta}_p(\text{deg/s})$	J_p	PR
10	0.050	0.006	0.723	0.614	5.18	0.68	5.1
2	0.165	0.050	0.580	0.476	4.07	0.42	3.9
1	0.272	0.178	0.537	0.458	3.80	0.36	3.5
0.33	0.695	1.036	0.473	0.466	3.55	0.28	2.9
0.1	2.055	3.602	0.434	0.524	3.55	0.25	2.6
0.01	3.132	3.931	0.452	0.659	3.76	0.27	2.8

表4 控制器与显示器同时合成时的设计结果及操纵品质

F_2	K_c	K_b	K_d	$e(\text{deg})$	$\delta_p(\text{deg})$	$\dot{\delta}_p(\text{deg/s})$	J_p	PR
2	0.145	0.125	0.117	0.540	0.413	2.77	0.29	3.0
1	0.261	0.314	0.113	0.505	0.392	2.51	0.24	2.5
0.33	0.694	1.375	0.103	0.449	0.397	2.27	0.19	1.9
0.1	1.135	2.588	0.097	0.410	0.435	2.71	0.15	1.3
0.01	1.867	4.882	0.095	0.380	0.435	3.27	0.13	1.0

选择 $F_3 = 1$ 和 $F_2 = 2, 1, 0.33, 0.1, 0.01$ 等几种情况进行控制器与显示器的同时合成,结果如表4所示.对比表3,各增益发生了明显变化,这种结果有别于传统设计,既增加了驾驶员操纵的灵敏度又保证了良好的人机闭环动态特性,使操纵品质和PR值获得最大

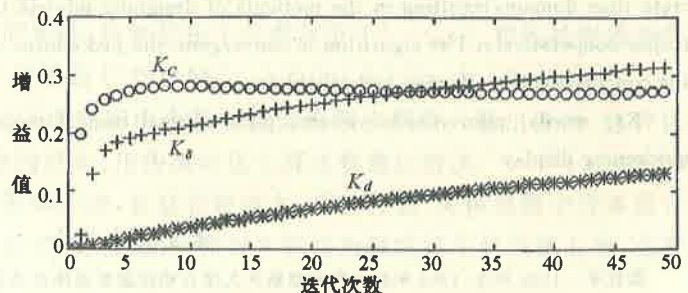


图3 控制器与显示器增益的典型迭代过程

程度的改善. $F_2 = F_3 = 1$ 的情况是值得推荐的最优设计方案.

图 3 是推荐方案的数值迭代曲线,说明本文算法的收敛性是有保证的. 图 4 的品质指标对操纵负荷的关系曲线基本再现了文献[3]所揭示的规律,证明本文的方法和结果都是有效的.

6 结 论

本文使用最优协调性合成设计方法解决了人机控制系统的显示规律合成设计问题,得到反映驾驶员在环要求的新控制规律,使操纵品质得到极大改善. 定量分析表明,虽然显示或控制的合成都能提高驾驶员评分,但是驾驶员在环的控制与显示作用的协调设计却是完善驾驶员辅助控制显示系统的最佳方案.

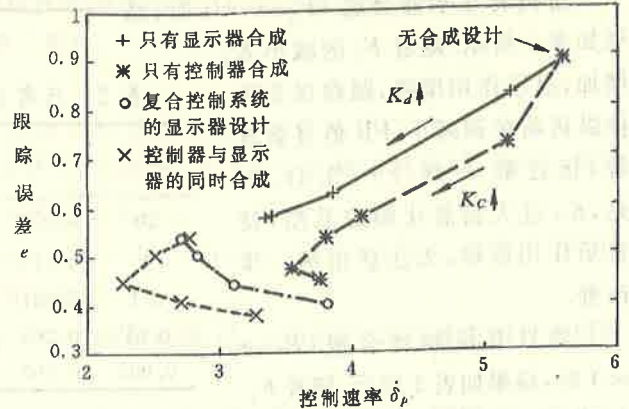


图 4 控制 / 显示作用合成设计的解析结果

参 考 文 献

- 1 McRuer, D., Graham, D., Krendel, E. and Reisener, W.. Human pilot dynamics in compensatory systems. AFFDL-TR-65-15, 1965
- 2 张红宇. 驾驶员辅助控制显示系统的设计及应用. 北京航空航天大学博士学位论文, 北京, 1995
- 3 Garg, S.. Model-based analysis and cooperative synthesis of control and display augmentation for piloted flight vehicles. Ph. D Thesis, Purdue University, 1988

Discrete Optimal Cooperative Synthesis of Control and Display for Pilot-Vehicle Systems

ZHANG Hongyu

(Department of Automatic Control, Beijing University of Aeronautics and Astronautics • Beijing, 100083, PRC)

Abstract: In this paper, based on reduced pilot optimal control model, the optimal cooperative synthesis techniques are applied in pilot-vehicle-display system, and a numerical iterative algorithm is constructed in discrete time domain, resulting in the methods of designing pilot-in-the-loop control laws for display and controller cooperatively. The algorithm is convergent, the procedures can reduce pilot's workload evidently, and the conclusions are effective and reliable.

Key words: pilot-vehicle system; pilot optimal control model; optimal cooperative synthesis; signal quickening display

本文作者简介

张红宇 1966年生. 1984年在北京航空航天大学自动控制系流体传动及控制专业学习, 1988年7月获学士学位并继续攻读该专业的硕士学位. 1990年9月提前攻读博士学位, 从事操纵系统和驾驶飞行控制系统的研究. 1992年9月至1994年4月赴日本九州大学工学部航空工学科留学, 1995年3月获工学博士学位. 主要研究兴趣: 人机控制, 预见控制和鲁棒控制等.