

多故障鲁棒检测滤波器设计

孙振陆 王炎生 王醒华 陈宗基

(北京航空航天大学自动控制系·北京, 100083)

摘要: 研究多个执行机构故障的检测和隔离问题. 首先提出多故障情况下检测滤波器的一种设计方法, 然后针对线性系统 A, B 阵的参数不确定性研究检测滤波器的鲁棒性问题, 最后采用某型号飞机方程进行仿真验证.

关键词: 故障检测和隔离; 故障检测滤波器; 鲁棒性

文献标识码: A

Robust Multiple Fault Detection Filter Design

SUN Zhenlu, WANG Yansheng, WANG Xinghua and CHEN Zongji

(Department of Automatic Control, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, 100083, P. R. China)

Abstract: This paper focuses on the problem of multiple actuator fault detection and isolation. First, a design method of detection filter under multiple faults is proposed. Then the robust problem of fault detection filter is investigated under the condition that the parameters of system matrix A and B are uncertain. The simulation test of the method in an aircraft equation is carried out in the end.

Key words: fault detection and isolation; fault detection filter; robustness

1 引言 (Introduction)

故障检测滤波器是一种利用解析冗余技术进行故障检测和隔离的方法, 其优点是故障的检测和隔离同时进行, 计算量小, 适合于线性系统的实时故障检测; 缺点是对系统参数不确定的鲁棒性较差. Beard^[1], Jones^[2], Massoumnia^[3], White 和 Speyer^[4]分别从矩阵代数、向量空间、几何空间、谱分析角度给出了故障检测滤波器的设计方法. 上述方法的共同缺点是设计过程含有不确定量, 必须依靠经验通过试凑才能解决. Park^[5]利用特征结构配置方法给出单故障情况下检测滤波器的一种系统化设计方法, 不需要试凑即可求出故障检测滤波器的增益阵.

本文首先提出多故障情况下检测滤波器的一种系统化设计方法, 然后针对线性系统 A, B 阵的参数不确定性研究故障检测滤波器的鲁棒性问题, 最后采用某型号飞机方程进行仿真验证.

2 系统描述 (System specification)

当考虑 A, B 阵参数不确定性时, 具有执行机构故障的系统方程表示为:

$$\dot{x}(t) = (A + \Delta A)x(t) + (B + \Delta B)u(t) + \sum_{i=1}^p f_i n_i(t), \quad (1)$$

$$y(t) = Cx(t). \quad (2)$$

其中 $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times p}$, $C \in \mathbb{R}^{m \times n}$ 为系统标称矩阵, $\Delta A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\Delta B \in \mathbb{R}^{n \times p}$ 代表模型误差, $f_i (i = 1, 2, \dots, p) \in \mathbb{R}^n$ 为执行机构故障事件向量, f_i 取为 B 矩阵的第 i 个列向量, $n_i(t) (i = 1, 2, \dots, p)$ 为未知的标量时间函数.

对于 A, B 阵第 i 行的任意参数发生变化, $\Delta A x(t) + \Delta B u(t)$ 都可以表示为 $E_i \theta_i(t)$, E_i 为第 i 个元素为 1 的单位列向量, $\theta_i(t) = \sum_j (\Delta a_{ij} x_j(t) + \Delta b_{ij} u_j(t))$. E_i 称为参数变化事件向量, 代表矩阵 A 或 B 的第 i 行参数发生变化. 当 A, B 阵多行参数发生变化时, 式(1)可表示为:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + \sum_{i=1}^n E_i \theta_i(t) + \sum_{i=1}^p f_i n_i(t). \quad (3)$$

故障检测滤波器的方程如下所示:

$$\dot{\hat{x}}(t) = \hat{A}\hat{x}(t) + Bu(t) + D(y(t) - \hat{y}(t)), \quad (4)$$

$$\hat{y}(t) = \hat{C}\hat{x}(t). \quad (5)$$

其中 $\hat{x}(t)$ 和 $\hat{y}(t)$ 分别为状态向量和输出向量的估计值, D 为检测滤波器增益阵. 定义状态误差向量为 $\xi(t) = x(t) - \hat{x}(t)$, 则系统的状态误差方程为:

$$\dot{\xi}(t) = (A - DC)\xi(t) + \sum_{i=1}^n E_i \rho_i(t) + \sum_{i=1}^p f_i n_i(t). \quad (6)$$

输出残差方程为:

$$q(t) = C\xi(t). \quad (7)$$

鲁棒故障检测滤波器的设计思想是通过选择合适的增益阵 D , 使当第 i 个执行机构发生故障时输出残差向量 $q(t)$ 的稳态值与 Cf_i 方向一致, 当系统 A, B 阵第 i 行参数具有不确定性时输出残差向量 $q(t)$ 的稳态值与 CE_i 方向一致.

3 多故障检测滤波器设计 (Multiple faults detection filter design)

给定故障事件向量集合 $F = [f_1 \ f_2 \ \cdots \ f_r]$, 设计故障检测滤波器要求系统满足以下条件:

- 1) (A, C) 是可观测对;
- 2) $CF = C[f_1 \ f_2 \ \cdots \ f_r]$ 的秩为 r .

将 $f_i (i = 1, 2, \dots, r)$ 配置为 $A - DC$ 的特征向量, 设其对应特征值为 $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, r)$, 则满足下列方程:

$$(A - DC)f_i = \lambda_i f_i, \quad i = 1, 2, \dots, r. \quad (8)$$

整理得:

$$DCF = [Af_1 - \lambda_1 f_1 \quad Af_2 - \lambda_2 f_2 \quad \cdots \quad Af_r - \lambda_r f_r]. \quad (9)$$

求解方程(9)需要用到以下引理.

引理 1^[5] 如果 D, S, Q 分别为 $n \times m, m \times r, n \times r$ 维矩阵, $n \geq m \geq r, \text{rank } S = r$, 则方程 $DS = Q$ 的解为:

$$D = QS^+ + E[I_m - SS^+],$$

其中 E 为任意 $n \times m$ 维矩阵, $S^+ = (S^T S)^{-1} S^T$, I_m 为 m 维单位阵.

则方程(9)的解为:

$$D = [Af_1 - \lambda_1 f_1 \quad Af_2 - \lambda_2 f_2 \quad \cdots \quad Af_r - \lambda_r f_r](CF)^+ + E[I_m - (CF)(CF)^+]. \quad (10)$$

式中 $(CF)^+ = ((CF)^T - (CF))^{-1}(CF)^T$, E 为任意 $n \times m$ 维矩阵, I_m 为 m 维单位阵.

定理 1 给定线性时不变系统 (A, B, C) 和故障向量集合 $F = [f_1 \ f_2 \ \cdots \ f_r]$, (A, C) 为可观测对, $CF = C[f_1 \ f_2 \ \cdots \ f_r]$ 的秩为 r , $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, r)$ 为 $(A - DC)$ 的期望特征值, 则式(10)为故障检测滤波器增益阵的解.

证 当故障事件向量集合为 F 时, 状态误差方程为

$$\dot{\xi}(t) = (A - DC)\xi(t) + \sum_{i=1}^r f_i n_i(t). \quad (11)$$

解方程得:

$$\xi(t) = e^{(A-DC)(t-t_0)} \xi(t_0) + \sum_{i=1}^r \int_0^t e^{(A-DC)(t-\tau)} f_i n_i(\tau) d\tau. \quad (12)$$

由 (A, C) 为可观测对可知, $A - DC$ 的特征值可任意配置. 选取 $A - DC$ 的所有特征值具有负实部, 则达到稳态时(12)式第一项为零. 当 D 为式(10)时, f_i 为 $A - DC$ 的特征向量, 则达到稳态时状态误差方程为:

$$\xi(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \left(\sum_{i=1}^r \int_0^t e^{(A-DC)(t-\tau)} f_i n_i(\tau) d\tau \right) = \sum_{i=1}^r v_i f_i. \quad (13)$$

式中 $v_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \left(\int_0^t e^{\lambda_i(t-\tau)} n_i(\tau) d\tau \right)$ 为标量. 输出残差为:

$$q(t) = C\xi(t) = \sum_{i=1}^r v_i Cf_i. \quad (14)$$

当发生故障 f_i 时, 输出残差向量 $q(t)$ 的方向为 Cf_i . 因此(10)所示的 D 阵是故障检测滤波器的增益阵. 证毕.

4 鲁棒故障检测滤波器组设计 (Robust fault detection filter design)

由方程(3)可知, 故障和参数变化对系统影响的主要区别在于两者的方向不同. 因此可以选取故障向量组 $F = [E_i, f_i]$, F 满足输出可分离性条件, 使输出残差向量对 f_i 和 E_i 在输出空间具有不同的方向, 从而把故障对系统的影响和参数变化对系统的影响解耦, 提高系统对参数变化的鲁棒性.

本文以下将故障事件向量和参数变化事件向量合称为事件向量, 以 h 表示.

为了使单个检测滤波器能检测的事件数最大, 取系统测量矩阵 C 为 n 维满秩方阵, 此时单个检测滤波器能检测的最大事件数为 n . 当考虑参数变化对系统的影响时, 系统需要检测的事件数一般大于 n (最大为 $n + p$), 此时必须采用故障检测滤波器组.

考虑 g 个 n 维事件向量的集合 $L, g > n, L$ 中的任意 n 个向量都线性无关. 为了检测此 g 个事件, 必须设计多个检测滤波器. 从 L 中任意取 n 个向量, 对此 n 个向量设计检测滤波器, 则总共可以设计 $s = C_g^n$ 个.

此故障检测滤波器组的检测逻辑如下:

设 FDF_i 为上述检测滤波器组中的任意一个检

测滤波器, 其对应的事件向量组为 $H_i = [h_1 \ h_2 \ \cdots \ h_n]$. 设 FDF_i 的输出残差向量 q_i 在 $Ch_1, Ch_2, \dots, Ch_n$ 方向上的投影分别为 $a_1, a_2, \dots, a_n$, 并且 $a_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 中有 θ_i 个不为零. 对其余检测滤波器重复上述过程. 如果存在唯一的 $\theta_i = \min_{i=1}^m \theta_i$, 则 FDF_i 的检测结果即为此检测滤波器组的检测结果; 如果存在多个最小值, 不妨设为 $\theta_1, \dots, \theta_w$. 如果此 w 个滤波器检测出的事件模式相同, 检测滤波器组的检测结果即为此 w 个滤波器的检测结果; 如果此 w 个滤波器检测出的事件模式不同, 检测滤波器组不能检测出正确结果.

关于此检测滤波器组有以下定理.

定理 2 考虑线性时不变系统 (A, B, C) , $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times p}$, $C \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\text{rank}(A) = n$, $\text{rank}(B) = \min(n, p)$, $\text{rank}(C) = n$. 设 L 为 g 个 n 维事件向量的集合, $g > n$, L 中的任意 n 个向量都线性无关. 设发生的事件模式为 $H' = [h'_1 \ h'_2 \ \cdots \ h'_k]$, $h'_i (i = 1, 2, \dots, k) \in L$, 则有:

1) 当 $k \leq \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor$ 时, 故障检测滤波器组必能检测出正确结果;

2) 当 $\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor < k \leq (n-1)$ 时, 故障检测滤波器组不一定能检测出正确结果;

3) 当 $k \geq n$ 时, 故障检测滤波器组不能检测出正确结果. 其中 $[x]$ 代表不大于 x 的最大整数.

证 设 $H' \subseteq H_i$, $H_i = [h_{i1} \ h_{i2} \ \cdots \ h_{in}]$, H_i 对应的检测滤波器为 FDF_i .

当 $k \leq \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor$ 时, FDF_i 的输出残差向量 q_i 在 $Ch_{i1}, \dots, Ch_{ik}$ 方向上投影不为零, 在其余方向投影为零, 则 $\theta_i = k$. 对于任意故障检测滤波器 FDF_j , $i \neq j$, 其对应的事件向量组为 $H_j = [h_{j1}, \dots, h_{jn}]$. 如

果 $H' \subseteq H_j$, FDF_j 的检测结果与 FDF_i 完全相同. 当 $h'_i (i = 1, 2, \dots, k)$ 不全属于 H_j 时, θ_j 必大于 k . 证明如下:

假定 $\theta_j \leq k$, 不妨设 FDF_j 的输出残差向量 q_j 在 $Ch_{j1}, \dots, Ch_{jp}$ 方向上投影不为零. 设 H' 中各个事件的幅值分别为 $n'_1, n'_2, \dots, n'_k, h_{ji} (i = 1, 2, \dots, \theta_j)$ 的幅值分别为 $n_{j1}, n_{j2}, \dots, n_{jp}$, 则必有以下方程成立:

$$n'_1 h'_{i1} + \dots + n'_k h'_{ik} = n_{j1} h_{j1} + \dots + n_{jp} h_{jp}.$$

即 $h'_{i1}, \dots, h'_{ik}, h_{j1}, \dots, h_{jp}$ 线性相关. 而 $k + \theta_j \leq n$, 与 L 中任意 n 个向量线性无关矛盾, 所以 θ_j 必大于 k .

因此, 当 $k \leq \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor$ 时故障检测滤波器组必能检测出正确结果.

当 $\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor < k \leq (n-1)$ 时, FDF_i 对应的 $\theta_i = k$. 因为 L 中任意 n 个向量线性无关, 则可能存在向量组 H_j , 且 H_j 中包含 k 个向量 $h_{j1}, \dots, h_{jk}$ 满足以下方程:

$$n'_1 h'_{i1} + \dots + n'_k h'_{ik} = n_{j1} h_{j1} + \dots + n_{jk} h_{jk}.$$

式中 $n'_i (i = 1, 2, \dots, k)$ 和 $n_{ji} (i = 1, 2, \dots, k)$ 均为不为零的标量, 且 $h_{ji} (i = 1, 2, \dots, k)$ 中至少有一个向量不属于 H' . FDF_j 对应的 $\theta_j = k$. 此时 $\theta_i = \theta_j = \min_{i=1}^m \theta_i$ 但 FDF_i 和 FDF_j 所检测出的事件模式不同, 因此故障检测滤波器组不能检测出正确结果. 当不存在上述向量组 H_j 时, 故障检测滤波器组能检测出正确结果.

当 $k \geq n$ 时, FDF_i 的输出残差向量 q_i 在 $Ch_i = [Ch_1 \ Ch_2 \ \cdots \ Ch_n]$ 的各个方向上投影都不为零. 当发生任意一个事件 $h \notin H_i$ 时, FDF_i 的输出残差向量 q_i 在 Ch_i 的各个方向上投影也都不为零, 所以故障检测滤波器组不能检测出正确结果. 证毕.

5 设计举例 (Example)

在 $M = 0.6$, $H = 3000\text{m}$ 时, 某型号飞机的状态方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\omega}_z \\ \dot{\beta} \\ \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.54300 & 1.00000 & 0 & 0 & 0 \\ -4.34000 & -0.97000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.15890 & 0 & 1.00000 \\ 0 & 0 & -23.52000 & -1.69400 & -1.24160 \\ 0 & 0 & -1.88500 & -0.03100 & -0.24790 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \omega_z \\ \beta \\ \omega_x \\ \omega_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.05550 & -0.05550 & -0.02290 & -0.02290 & 0 \\ -1.82800 & -1.82800 & -0.36400 & -0.36400 & 0 \\ 0.00986 & -0.00986 & 0.00107 & -0.00107 & -0.02410 \\ -7.84000 & 7.84000 & -4.33000 & 4.33000 & -2.82000 \\ 0.07370 & -0.07370 & 0.04080 & -0.04080 & -1.03000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_z \\ \delta_{xr} \\ \delta_{xl} \\ \delta_y \end{bmatrix}.$$

其中状态变量 α 为攻角, β 为侧滑角, ω_x 为滚转角速度, ω_y 为偏航角速度, ω_z 为俯仰角速度. 控制变量 δ_w 为右平尾, δ_u 为左平尾, δ_{w_r} 为右副翼, δ_{u_l} 为左副翼, δ_y 为方向舵.

取测量矩阵 C 为 5 维单位矩阵, 故障事件向量组 $F = [f_1 f_2 f_3 f_4 f_5] = B$. 只考虑 A, B 阵第 3 行参数的变化, 参数变化事件向量为 $E_3 = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]^T$, 则 $L = [f_1 f_2 f_3 f_4 f_5 E_3]$. 因为 L 中的任意 5 个向量线性无关, 则可以对以下向量组设计故障检测滤波器:

$$\begin{aligned} &[f_1 f_2 f_3 f_4 f_5], [f_1 f_2 f_3 f_4 E_3], \\ &[f_1 f_2 f_3 f_5 E_3], [f_1 f_2 f_4 f_5 E_3], \\ &[f_1 f_3 f_4 f_5 E_3], [f_2 f_3 f_4 f_5 E_3]. \end{aligned}$$

取控制输入量 $u = [0.5 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.5]^T$. 设右平尾在 $t = 3$ 秒时发生故障, 输入效率损失为 30%, 对应的故障事件向量为 f_1 . 设 $\Delta A(3, 5) = 0.2$, $\Delta A(3, 4) = 0.1$, $\Delta B(3, 5) = 0.005$, 对应的事件向量为 E_3 , 达到稳态时各个故障检测滤波器的输出残差在各个方向上的投影如下(表 1 和表 2 中空格表示故障检测滤波器在此方向上无输出):

表 1 单故障时故障检测滤波器组的输出结果

Table 1 The output of the fault detection filter group under single fault

	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	E_3
FDF ₁	-2.6761	2.7061	4.8994	-4.8994	0.0009	
FDF ₂	0.0300	0.0000	0.0000	0.0000		-0.0429
FDF ₃	0.0300	0.0000	0.0000		0.0000	-0.0429
FDF ₄	0.0300	0.0000		0.0000	0.0000	-0.0429
FDF ₅	0.0300		0.0000	0.0000	0.0000	-0.0429
FDF ₆		0.0300	0.0543	-0.0543	0.0000	-0.0424

由表 1 可得, 故障检测滤波器 FDF₂, FDF₃, FDF₄, FDF₅ 不为零的输出只有两个, 对应的事件向量为 f_1 和 E_3 , 则故障检测滤波器组的检测结果为右平尾发生故障且飞机方程 A, B 阵的第三行某些参数与实际不一致.

设右平尾和左平尾在 $t = 3$ 秒时同时发生故

障, 右平尾输入效率损失为 30%, 左平尾输入效率损失为 70%, 两种故障对应的故障事件向量分别为 f_1 和 f_2 . 设 $\Delta A(3, 5) = 0.2$, $\Delta A(3, 4) = 0.1$, $\Delta B(3, 5) = 0.005$, 对应的事件向量为 E_3 , 达到稳态时各个故障检测滤波器的输出残差在各个方向上的投影如下:

表 2 双故障时故障检测滤波器组的输出结果

Table 2 The output of the fault detection filter group under dual faults

	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	E_3
FDF ₁	-0.4725	0.5725	0.9097	-0.9097	0.0002	
FDF ₂	0.0300	0.0700	0.0000	0.0000		-0.0080
FDF ₃	0.0300	0.0700	0.0000		0.0000	-0.0080
FDF ₄	0.0300	0.0700		0.0000	0.0000	-0.0080
FDF ₅	0.1000		-0.1267	0.1267	0.0000	-0.0091
FDF ₆		0.1000	0.0543	-0.0543	0.0000	0.0075

由表 2 可得, 故障检测滤波器 FDF₂, FDF₃, FDF₄ 不为零的输出只有三个, 对应的事件向量为 f_1, f_2 和 E_3 , 则故障检测滤波器组的检测结果为右平尾和左平尾发生故障且飞机方程 A, B 阵的第三行某些参数与实际不一致. 因此当同时发生的事件数大于 2 时, 故障检测滤波器组依然有可能给出正确结果.

上述仿真结果表明, 采用参数变化事件向量表示系统的参数不确定性可以将其对残差的影响与故障对残差的影响分开, 减少系统的误报次数, 增强系

统对参数不确定性的鲁棒性.

6 结论 (Conclusion)

本文提出的设计方法给出多故障情况下检测滤波器增益阵的基本结构, 具有设计过程系统、简单等优点; 利用参数事件向量表示系统 A, B 阵的参数不确定性, 通过输出残差的方向区分执行机构故障和参数不确定性对系统的影响, 提高了系统的鲁棒性. 本文只考虑了系统针对模型误差的鲁棒性, 利用滤波器增益阵的基本结构还可以针对噪声设计最优故

障滤波器.

Part I: closed-form algorithm[J]. Int. J. Control, 1994, 60(5): 767

- 787

参考文献(References)

本文作者简介

- [1] Beard R V. Failure accommodation in linear systems through self-reorganization[R]. ManVehicle Lab., Mass. Inst. Technol., Cambridge, MA, Rep. MVT-71-1, 1971
- [2] Jones H L. Failure detection in linear systems[R]. The Charles Stark Draper Laboratory, Cambridge, MA, Rep. T-608, 1973
- [3] Massoumnia M. A geometric approach to the synthesis of failure detection filters[J]. IEEE Trans. on Automatic Control, 1986, 31(9): 790-796
- [4] White J E and Speyer J L. Detection filter design: spectral theory and algorithms[J]. IEEE Trans. on Automatic Control, 1987, 32(7): 593-603
- [5] Park J and Rizzoni G. A new interpretation of fault detection filter,

孙振陆 1972 年生, 现为北京航空航天大学自动控制系博士研究生, 主要研究方向为自修复飞行控制系统的故障检测和隔离。

王炎生 1962 年生, 现为北京航空航天大学自动控制系副教授, 主要研究方向为鲁棒控制系统的理论及应用研究, 飞行器试验统计方法的研究等。

王耀华 1962 年毕业于北京航空航天大学自动控制系, 现为北京航空航天大学自动控制系教授, 主要研究方向为自修复飞控系统故障检测和重构技术研究。

陈宗基 1943 年生, 1983 年获得英国曼彻斯特大学博士学位, 现为北京航空航天大学自动控制系教授, 博士生导师, 主要研究方向为鲁棒控制系统的理论与应用、人工智能与专家系统及分布交互仿真技术研究等。

第 19 届中国控制会议在香港圆满结束

中国自动化学会第 19 届中国控制会议(2000'CCC)于 2000 年 12 月 5 日至 8 日在香港举行, 此次会议于 1997 年开始酝酿, 1999 年启动, 2000 年 1 月正式筹备, 历时三年。会议由中国自动化学会控制理论专业委员会主办, 香港工程师协会控制、自动化与仪表分会承办, 得到中国自动化学会和香港工程师协会的大力支持和指导。第 19 届中国控制会议是第一次在大陆境外举行, 而且也是香港回归祖国后第一次承办的中国控制会议, 会议受到香港工业界和自动控制界同行的鼎力相助。

参加 2000'CCC 的代表共 170 余人, 他们分别来自中国大陆、香港、澳门、日本、美国、加拿大、英国、法国和印度等十多个国家和地区。除会议代表外, 香港工业界人士和香港各大学自动控制专业的研究生和高年级大学生参加了会议开幕式。2000'CCC 指导委员会主席秦化淑研究员致开幕词, 并代表控制理论专业委员会向会议代表表示热烈欢迎, 陈翰馥院士代表中国自动化学会向 2000'CCC 致贺词。

2000'CCC 组织了四个大会报告, 报告题目和报告人分别是: 现代集成制造系统中的系统和控制问题(吴澄, 清华大学); 控制系统中的信息和复杂性(王乐一, 美国 Wayne 州立大学); 用反馈生成控制的工程应用(陈关荣, 香港城市大学); 带有执行器饱和系统的设计和稳定性问题(陈志伟, 香港大学)。

2000'CCC 共分为 31 个演讲报告组, 3 个张贴报告组。绝大多数分组学术报告会参加者踊跃, 宣讲者认真, 讨论热烈。会议期间举行了题为“自动化和控制的未来趋势”的圆桌讨论会。会上, 代表们与香港工业界进行了对话, 听取了工业界对自动控制研究的需求及可能的合作意向。同时进行了题为“新世纪中控制面临的挑战”的专题讨论会。会上五位教授做了重点发言, 即复杂性科学(郭雷, 中国科学院系统科学所); 控制系统的复杂性(黄琳, 北京大学); 基于信息的自动控制(席裕庚, 上海交通大学); 机器人学与机器人控制的教学与科研(李泽湘, 香港科技大学); 系统建模对反馈控制是否真的必要吗?(Dr. K. F. Man, 香港城市大学)。

12 月 8 日下午举行了 2000'CCC 闭幕式及《关肇直奖》颁奖仪式。评奖委员会主任黄琳教授宣布了本届《关肇直奖》的获奖论文: 线性化和 Brockett 积分器的镇定(孙振东, 北京航空航天大学); 能观测性估计(张旭, 四川大学)。黄琳教授回顾了历届“关肇直”奖获得者在他们的后续性研究工作和应用工作中取得的优异成绩。2000'CCC 程序委员会双主席之一郭雷教授致了闭幕词。

2000'CCC 的宴会上, 中国自动化学会副理事长席裕庚教授、香港工程师协会前主席陈清泉院士在会上发表热情洋溢讲话, 他们为大陆和香港自动控制界的成功合作, 为促进本学科在新世纪的蓬勃发展有了良好开端, 表示由衷的庆祝。

2000'CCC 得到香港控制界同行的大力支持, 他们不仅为会议做了许多组织和会务工作, 而且还积极有效地为会议筹措资金, 为会议顺利召开奠定了基础, 受到与会代表的衷心感谢和称赞。