Institute of Systems Science and Intelligent Control Technology 系统科学与智能控制技术研究所

# 鲁棒控制：建模、跟踪、抗扰、容错

周克敏
山东科技大学
电气与自动化工程学院
**2020年5月28日**
（第八讲）

---

# 提纲



2

---

# 故障与故障诊断(Wikipedia)

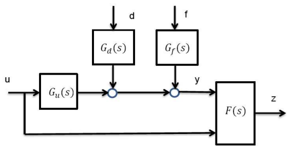
- In document ISO 10303-226, a **fault** is defined as an abnormal condition or defect at the component, equipment, or sub-system level which may lead to a failure.
- **Fault detection, isolation, and recovery** is a subfield of control engineering which concerns itself with monitoring a system, identifying when a fault has occurred, and pinpointing the type of fault and its location. Techniques include model-based FDI and signal processing based FDI.

---

# 标准故障诊断模型

标准模型假设

$\dot{x} = Ax + Bu + B_d d + B_f f$
$y = Cx + Du + D_d d + D_f f$




$y = G_u u + G_d d + G_f f$

- 设计一个滤波器F(s)，使得$z = F(s)\begin{bmatrix} y \\ u \end{bmatrix}$
  - 与输入u和扰动d解耦
  - 或者使得u和d对z的影响越小越好
  - 同时使得f到z的传输非零
  - 或者在某种意义上越大越好
- 标准的方法是设计一个观测器。

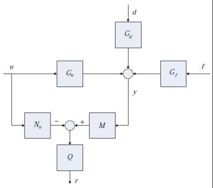
---

# 故障诊断滤波器一般形式

- 系统模型

$y = G_u u + G_d d + G_f f$

$[\,G_u \quad G_d \quad G_f\,] = M^{-1}[\,N_u \quad N_d \quad N_f\,]$



- 故障诊断滤波器
  一般形式

F(s)

$r = Q(My - N_u u) = Q[\,M \quad -N_u\,]\begin{bmatrix} y \\ u \end{bmatrix}$

$r = Q[\,N_d \quad N_f\,]\begin{bmatrix} d \\ f \end{bmatrix} = QN_d d + QN_f f$

---

# 结论

在这个模型下
- Q的自由度包含了所有可能的滤波器
- 故障诊断滤波器F(s)的设计和u是如何产生的无关！

问题是：
- 模型中的假设是否合理？？？？？
- 答案是否定的！
- 系统故障不能假设为“加”性的！

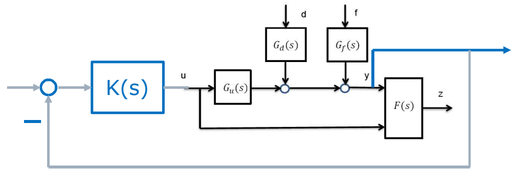
## 为什么不能认为是“加”性

如果是
- 可以归到扰动中，那么容错就是抗扰
- 故障诊断等价于扰动估计

- 故障是系统内部的变化
- 故障不可能是外部输入信号

➢ 不存在“加”性故障！

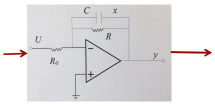
## 闭环故障诊断




在这个模型下
- 故障诊断滤波器F(s)的设计和u是如何产生的无关！
- 故障诊断滤波器F(s)的设计与控制器K(s)无关！
- 闭环故障诊断和开环故障诊断是一样的！

显然不合理！

## 开环故障诊断




$$\dot{x}_s = -\frac{1}{RC}x_s + \frac{1}{R_0C}u,\ x_s(0) = 0$$

$$y = -x_s,\quad R = \frac{R_0}{1+\delta(t)},\ -1 \le \delta(t) \le 0$$

**Fault Detection Model:** $R_0C = 1$

$$\dot{x}_m = -\frac{1}{R_0C}x_m + \frac{1}{R_0C}(-\delta(t)x_m) + \frac{1}{R_0C}u = -x_m + f + u,\ f = -\delta(t)x_m$$

$$y_m = -x_m$$

$$\delta(t) = \begin{cases} 0, & 0 \le t < 2 \\ -1, & t \ge 2 \end{cases}$$

**Fault Detection Observer:**

$$\dot{\hat{x}} = -\hat{x} + u + L(\hat{y} - y_m),\ \hat{y} = -\hat{x}$$

$$e_m := x_m - \hat{x},\ \textbf{Then}\ \dot{e}_m = -(1+L)e_m + f,$$

$$e_r := x_s - \hat{x},\ \textbf{Then}\ \dot{e}_r = -(1+L)e_r - \delta(t)x_s,$$

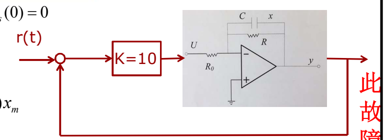
$$x_s(t) = \begin{cases} e^{-t} * u(t), & 0 \le t \le 2 \\ x_s(2) + \int_2^t u(\tau)d\tau, & t \ge 2 \end{cases}$$

$e_m$不依赖于 ***u*** ，但 $e_r$ **does!!!!**

## 闭环故障诊断

$$\dot{x}_s = -(K+1+\delta(t))x_s + Kr,\ x_s(0) = 0$$

$$y = -x_s$$




**Fault Detection Model:**

$$\dot{x}_m = -x_m + f + u,\ f = -\delta(t)x_m$$

$$y_m = -x_m$$

**Fault Detection Observer:**

$$\delta(t) = \begin{cases} 0, & 0 \le t < 2 \\ -1, & t \ge 2 \end{cases}$$

$$\dot{\hat{x}} = -\hat{x} + u + L(\hat{y} - y_m),\ \hat{y} = -\hat{x}$$

$$e_m := x_m - \hat{x},\ \textbf{Then}\ \dot{e}_m = -(1+L)e_m + f,$$ 和开环一样！

$$e_r := x_s - \hat{x},\ \textbf{Then}\ \dot{e}_r = -(1+L)e_r - \delta(t)x_s,$$

$$x_s(t) = \left\{ \begin{array}{ll} Ke^{-(K+1)t} * r(t), & 0 \le t \le 2 \\ e^{-K(t-2)}x_s(2) + \int_2^t Ke^{-K(t-\tau)}r(\tau)d\tau, & t \ge 2 \end{array} \right\} \approx r(t)$$

$e_m$不依赖于 ***r*** ，但 $e_r$ **does!!!!**

此故障对闭环危害性很小

## 结论

- 现行的故障诊断模型不合理!
- 基于现行的模型故障检测与诊断不可行。不能真正解决诊断问题！
- 需要新架构和新方法
- 另外，有些故障并不需要检测或诊断
- 需要故障的新分类方法：哪些故障需要检测，那些不需要？

## 故障容错和鲁棒控制的关系

- 故障～变化～不确定性
- 容错～鲁棒
- 故障分级～不确定性大小～不确定性危害性
- 故障分类～不确定性结构
- 。。。。。。

## 建模问题

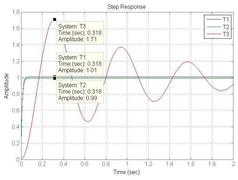
- 控制的效果取决于系统的建模
- 如何从系统开环模型的差异（距离）来判断闭环之间的差异？
- 用H无穷范数来界定不确定性大小是否合适？

例如 $G_1=100/(s-1)$和$G_2=100/(s+1)$，稳定与不稳定系统之间H无穷范数不存在。 L无穷范数也很大。

但从反馈控制角度来说，这两个系统很近，很近。如何正确度量两个系统之间的距离是关键。

## 系统距离：开环与闭环

- $\mathbf{K}(s) = 10$
- $G_1(s) = \frac{10}{s-1}$， $G_2(s) = \frac{10}{s+1}$， $G_3(s) = \frac{10}{(s+1)^2}$
- $T_1(s) = \frac{100}{s+99}$，
- $T_2(s) = \frac{100}{s+101}$，
- $T_3(s) = \frac{100}{s^2+2s+101}$




$$\|G_1(s)-G_2(s)\|_\infty = \infty = \|G_1(s)-G_3(s)\|_\infty,\ \|G_2(s)-G_3(s)\|_\infty \approx 5$$

$$\|T_1(s)-T_2(s)\|_\infty \approx 0.02,\ \|T_1(s)-T_3(s)\|_\infty \approx \|T_2(s)-T_3(s)\|_\infty \approx 5$$

## 系统距离：开环与闭环（续）

- $\mathbf{K}(s) = 100$
- $G_1(s) = \frac{10}{s-1}$， $G_2(s) = \frac{10}{s+1}$， $G_3(s) = \frac{10}{(s+1)^2}$
- $T_1(s) = \frac{1000}{s+999}$， $T_2(s) = \frac{1000}{s+1001}$， $T_3(s) = \frac{1000}{s^2+2s+1001}$

$$\|G_1(s)-G_2(s)\|_\infty = \infty = \|G_1(s)-G_3(s)\|_\infty,\ \|G_2(s)-G_3(s)\|_\infty \approx 5$$

$$\|T_1(s)-T_2(s)\|_\infty \approx 0.002,\ \|T_1(s)-T_3(s)\|_\infty \approx \|T_2(s)-T_3(s)\|_\infty \approx 15.8$$

很显然控制器影响标称闭环效果
被控对象的差异不能全面反映闭环差异

## 系统的性能与鲁棒性评估

- 鲁棒跟踪、抗扰、。。。。。。
- 鲁棒稳定
- 鲁棒稳定裕度

## 系统性能与稳定裕度

定义性能指标和稳定裕度：

$$b_{P,K} := \begin{cases} \left( \left\| \begin{bmatrix} I \\ K \end{bmatrix} (I+PK)^{-1} \begin{bmatrix} I & P \end{bmatrix} \right\|_\infty \right)^{-1} & \text{if } K \text{ stabilizes } P \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

并最优控制： $b_{opt} := \sup_K b_{P,K}$.

那么

$$P = \left[\begin{array}{c|c} A & B \\ \hline C & D \end{array}\right]$$

$$b_{opt} = \sqrt{1-\lambda_{\max}(YQ)}$$

where $Y$ and $Q$ are the solutions to

$$AY + YA^* - YC^*CY + BB^* = 0, \quad Q(A-YC^*C) + (A-YC^*C)^*Q + C^*C = 0.$$

## 为什么这个指标？

$b_{P,K} > 0$ 意味着 $K$ 也鲁棒镇定:

- $P_a = P + \Delta_a$ （加性不确定性）其中 $P_a$ 与 $P$具有相同的不稳定极点并且 $\|\Delta_a\|_\infty < b_{P,K}$.
- $P_m = (I+\Delta_m)P$ （乘性不确定性）其中 $P_m$与 $P$具有相同的不稳定极点并且 $\|\Delta_m\|_\infty < b_{P,K}$.
- $P_f = (I+\Delta_f)^{-1}P$ （反馈不确定性）其中 $P_f$与 $P$具有相同的不稳定极点并且 $\|\Delta_f\|_\infty < b_{P,K}$.
- $P_{fac} = (M+\Delta_m)^{-1}(N+\Delta_n)$, $P=M^{-1}N$ 并且 $\|[\Delta_m\ \Delta_n]\|_\infty < b_{P,K}$.

鲁棒性对P 与 K是一样的： $b_{P,K} = b_{K,P}$

（没有控制器的脆弱性）

## 为什么这个指标？

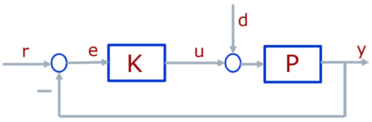
SISO P：增益裕度 $\geq \frac{1+b_{P,K}}{1-b_{P,K}}$　相位裕度 $\geq 2\arcsin(b_{P,K})$

$$\begin{bmatrix} I \\ K \end{bmatrix}(I+PK)^{-1}\begin{bmatrix} I & P \end{bmatrix}$$

$$=\begin{bmatrix} (I+PK)^{-1} & (I+PK)^{-1}P \\ K(I+PK)^{-1} & K(I+PK)^{-1}P \end{bmatrix}$$

$$=\begin{bmatrix} T_{er} & -T_{ed} \\ T_{ur} & -T_{ud} \end{bmatrix}$$

性能不要求每项都小，也不可能




## 如何达到合适性能

- 单变量系统用古典回路成型设计
- 多变量系统用$\mathbf{H}_\infty$回路成型设计

- (1) Loop Shaping: Obtain a desired open-loop shape (singular values) by using a precompensator $W_1$ and/or a postcompensator $W_2$,

$$P_s=W_2PW_1$$

Assume that $W_1$ and $W_2$ are such that $P_s$ contains no hidden modes.

- (2) (a) Calculate robust stability margin $b_{opt}(P_s)$. If $b_{opt}(P_s) <<1$, return to (1) and adjust $W_1$ and $W_2$. (b) Select $\varepsilon \leq b_{opt}(P_s)$, then synthesize a stabilizing controller $K_\infty$ which satisfies

$$\left\| \begin{bmatrix} I \\ K_\infty \end{bmatrix}(I+P_sK_\infty)^{-1}\tilde{M}_s^{-1} \right\|_\infty \leq \varepsilon^{-1}.$$

- (3) The final controller $K=W_1K_\infty W_2$

## ν-间隙度量(读作nu)

- 在满足某个**winding number**条件下，两个系统$P_1(s)$和$P_2(s)$之间的ν-间隙度量**(Vinnicombe,1993)**：

$$\delta_\nu(P_1,P_2)=\sup_{\omega\in R}\frac{|P_1(j\omega)-P_2(j\omega)|}{\sqrt{1+|P_1(j\omega)|^2}\sqrt{1+|P_2(j\omega)|^2}} \quad (\leq 1)$$

- 如果$\tilde{P}(s)$和$\tilde{K}(s)$满足　$\delta_\nu(\tilde{P},P)\leq r_P$　$\delta_\nu(\tilde{K},K)\leq r_K$

则此系统也稳定，当且仅当

$$\arcsin b_{P,K} > \arcsin r_P + \arcsin r_K$$

并且有

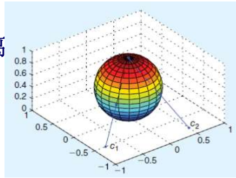
$$\arcsin b_{\tilde{P},\tilde{K}} \geq \arcsin b_{P,K} - \arcsin r_P - \arcsin r_K$$

## 立体投影

- 两个实(复)数距离：$d=|c_1-c_2|$。
- 不能描述距离的相对大小：$d=|1-2|=|100-101|=1$。但是由**1**到**2**的变化是**100%**，而由**100**到**101**的变化仅仅**1%**。

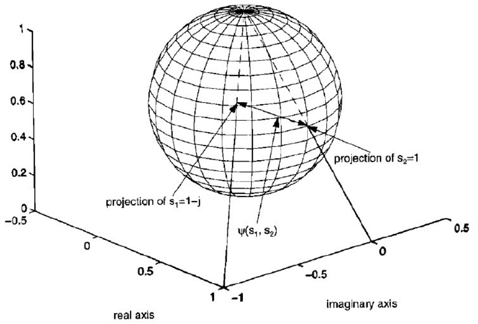
- 立体投影后球面上两点弦距离

$$\delta_\nu(c_1,c_2)=\frac{|c_1-c_2|}{\sqrt{1+|c_1|^2}\sqrt{1+|c_2|^2}}$$



- 弧距离是 **arcsin** $\delta_\nu$
- 那么，$\delta_\nu(1,2)=\frac{1}{\sqrt{10}}$，$\delta_\nu(100,101)\approx 10^{-4}$

$$\psi(P_1(j\omega),\ P_2(j\omega))=\frac{|P_1(j\omega)-P_2(j\omega)|}{\sqrt{1+|P_1(j\omega)|^2}\ \sqrt{1+|P_2(j\omega)|^2}}$$




## 弦距离充分条件

系统也稳定，当

$$b_{P,K} > r_P + r_K$$

例如：$\mathbf{r_p=0.5, r_k=0.5, b_{p,k}=0.9}$ **. Then**

$$0.9 < 0.5+0.5 \text{ (弦距离充分条件不成立)}$$

但是充要条件成立

$$\arcsin 0.9 > \arcsin 0.5 + \arcsin 0.5$$

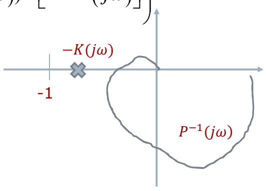
## 和逆奈奎斯特关系

$$b_{P,K}(\omega) := \delta_v\left(-K^{-1}(j\omega), P(j\omega)\right) = \delta_v\left(-K(j\omega), P^{-1}(j\omega)\right)$$

$$= \frac{\left|-K^{-1}(j\omega) - P(j\omega)\right|}{\sqrt{1+\left|K^{-1}(j\omega)\right|^2}\sqrt{1+\left|P(j\omega)\right|^2}} = \frac{\left|-K(j\omega) - P^{-1}(j\omega)\right|}{\sqrt{1+\left|K(j\omega)\right|^2}\sqrt{1+\left|P^{-1}(j\omega)\right|^2}}$$

$$= 1/\bar{\sigma}\left(\begin{bmatrix} I \\ K(j\omega) \end{bmatrix}(I + P(j\omega)K(j\omega))^{-1}\begin{bmatrix} I & P(j\omega) \end{bmatrix}\right)$$

$$b_{P,K} = \min_{\omega \in R} b_{P,K}(\omega)$$



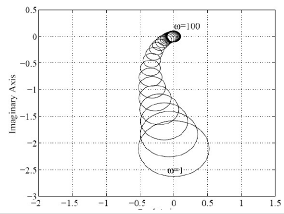

## 另类定义: ν-间隙度量

两个系统$P_1(s)$和$P_2(s)$之间的ν-间隙度量

$$\delta_v(P_1, P_2) := \sin \sup_{C\epsilon stabilizing} \left|\arcsin b_{P_1C} - \arcsin b_{P_2C}\right|$$

$$G(s) = \frac{10(s+1)}{s(s+2)(s+3)}$$

$$\delta_v(G(s), \tilde{G}(s)) \le 0.1$$




低频不确定性危害性小

## 系统距离：开环与闭环

- $G_1(s) = \frac{10}{s-1}$，$G_2(s) = \frac{10}{s+1}$，$G_3(s) = \frac{10}{(s+1)^2}$
- $\delta_v\left(G_1(s), G_2(s)\right) = 0.1980$，很小
- $\delta_v\left(G_1(s), G_3(s)\right) = 0.7695$，很大
- $\delta_v\left(G_2(s), G_3(s)\right) = 0.8181$，很大

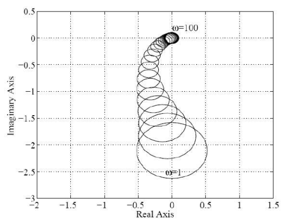
## 系统距离：控制器影响

- $C(s) = 10$
- $\delta_v\left(10G_1(s), 10G_2(s)\right) = 0.02$,
- $\delta_v\left(10G_1(s), 10G_3(s)\right) = 0.9541$
- $\delta_v\left(10G_2(s), 10G_3(s)\right) = 0.9573$ 。
- $C(s) = 100$
- $\delta_v\left(100G_1(s), 100G_2(s)\right) = 0.002$,
- $\delta_v\left(100G_1(s), 100G_3(s)\right) = 0.9904$
- $\delta_v\left(100G_2(s), 100G_3(s)\right) = 0.9906$ 。

## ν-间隙度量下不确定性

$$G(s) = \frac{10(s+1)}{s(s+2)(s+3)}$$

The corresponding uncertain Nyquist diagram for $\delta_v(G(s), \tilde{G}(s)) \le 0.1$ with $\omega \in [1, 100]$ at each frequency.




低频不确定性危害性小

## ν-间隙度量与互质因子不确定性

$$\{P : \delta_v(P_0, P) < r\} \supset \left\{P = (N_0 + \Delta_N)(M_0 + \Delta_M)^{-1} : \begin{bmatrix} \Delta_N \\ \Delta_M \end{bmatrix} \in H_\infty, \left\|\begin{bmatrix} \Delta_N \\ \Delta_M \end{bmatrix}\right\|_\infty < r\right\}.$$

## 举例：最优标称模型

- 给定不确定系统

$$P(s)=\frac{k}{s-1}, \quad k\in[k_1,k_2]$$

- 寻求最优标称模型 $P_0=\frac{k_0}{s-1}$

$$\inf_{k_0\in[k_1,k_2]}\ \sup_{k\in[k_1,k_2]}\ \delta_v(P_0,P)$$

- 最优解

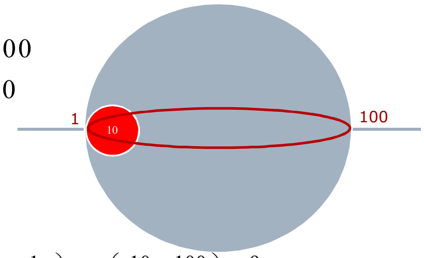
$$k_0=\sqrt{k_1k_2}$$

---

$k_1=1$

$k_2=100$

$k_0=10$

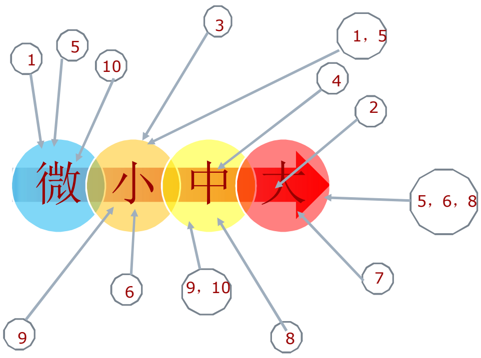



$$\delta_v\left(\frac{10}{s-1},\frac{1}{s-1}\right)=\delta_v\left(\frac{10}{s-1},\frac{100}{s-1}\right)=\frac{9}{11}$$

$$\delta_v\left(\frac{50.5}{s-1},\frac{1}{s-1}\right)=\delta_v\left(\frac{50.5}{s-1},\frac{2525}{s-1}\right)=\frac{49.5}{51.5}>\frac{9}{11}$$

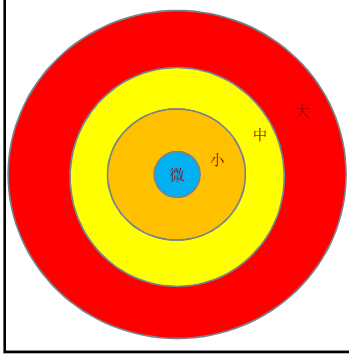
---

## 故障分类与分级




---

## 故障分级




按照故障系统相对原系统的间隙距离分成故障各等级：

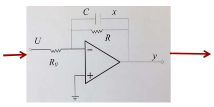
- 微小故障：$\delta_v(P_0,P)<\varepsilon 1$
- 小故障：$\varepsilon 1\le\delta_v(P_0,P)<\varepsilon 2$
- 中等故障：$\varepsilon 2\le\delta_v(P_0,P)<\varepsilon 3$
- 大故障：$\varepsilon 3\le\delta_v(P_0,P)<\varepsilon 4$
- 。。。。。

---

## 故障分级（开环）

$$\dot{x}_s=-\frac{1}{RC}x_s+\frac{1}{R_0C}u,\ x_s(0)=0$$

$$y=-x_s,\quad R=\frac{R_0}{1+\delta(t)},\quad -1\le\delta(t)\le 0$$




**Nominal Model:** $R_0C=0.1$

$$P(s)=\frac{10}{s+10}$$

**Faulty Model: (significant fault in the open loop sense)**

$$P_f(s)=\frac{10}{s}$$

**However,** $\delta_v(P,P_f)=\frac{\sqrt{2}}{2},\quad \delta_v(10P,10P_f)\approx\frac{1}{10}$

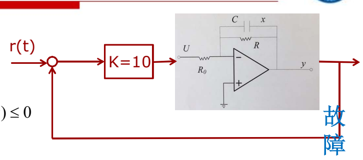
---

## 故障分级（闭环）

$$\dot{x}_s=-\frac{1}{RC}x_s+\frac{1}{R_0C}u,\ x_s(0)=0$$

$$u=K(r-y)$$

$$y=-x_s,\quad R=\frac{R_0}{1+\delta(t)},\quad -1\le\delta(t)\le 0$$




故障对闭环危害性很小

**Open Loop Nominal Model:** $R_0C=0.1$

$$P(s)=\frac{10K}{s+10}$$

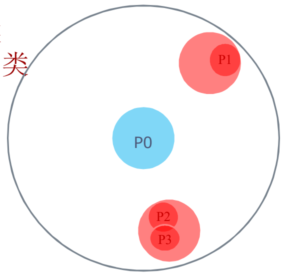
**Faulty Open Loop Model: (significant fault in the open loop sense)**

$$P_f(s)=\frac{10K}{s}$$

**However,** $\delta_v(P,P_f)\approx\frac{1}{K}$ **for** $K\gg 1$

## 故障分类

- 同类：所产生的模型之间v-gap距离小
  - 闭环特性相近
  - 微小故障显然同类
  - 中大故障可能不同类




- 微小故障显然同类
- P2, P3同类,与P1同级、不同类

## 总结

- 现在基于模型的故障诊断不合理
- v-gap（or gap) 提供了一个可能架构
- 在v-gap结构下的故障诊断还有待研究
- 问题比方法多
- 希望在将来的5~10年能提供更合适的方法
- 邀请各位共同努力

## 一个可能的故障诊断模型

**Assumptions:**

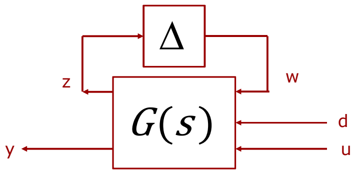
- Faults caused by parameter changes in the system
- Not by external facts

**Hence faults can always be characterized by parameters:** $\delta_i \in [-1,0]$

- $\delta_i = 0$ : No fault
- $\delta_i = -1$ : Full effect fault
- $-1 < \delta_i < 0$ : Intermediate fault

**Let** $\Delta = diag\{\delta_1 I_{r_1}, \delta_2 I_{r_2}, \cdots, \delta_m I_{r_m}\}$

- d: external disturbances
- u: system inputs
- y: everything measurable (including conventional outputs and anything helpful in diagnosis faults




$$y = G_d(s,\Delta)d + G_u(s,\Delta)u$$

## State Space From

$$w = \Delta z$$
$$\dot{x} = Ax + B_0 w + B_1 d + B_2 u$$
$$z = C_0 x + D_{00} w + D_{01} d + D_{02} u$$
$$y = C_2 x + D_{20} w + D_{21} d + D_{22} u$$

## 故障诊断基于参数估计

- **Define** $\delta(t) \triangleq [\delta_1(t), \delta_2(t), \cdots, \delta_m(t)]$
- **The input-output relationship is given by**

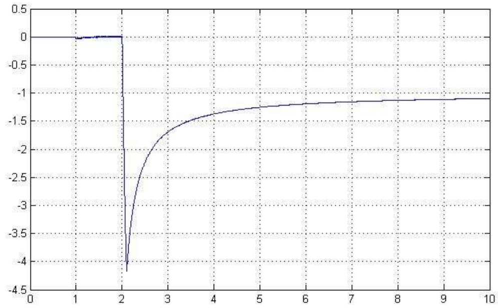
$$\phi(t) = \theta(t)\varphi(t) + n(t)$$

where $\phi(t)$ and $\varphi(t)$ are computable from input/output data and $n(t)$ are related to noise or disturbances.

- **The parameter θ(t) is estimated from**

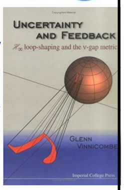
$$\theta(t) = \arg\min \sum_{j=t-N}^{t} (\phi(j) - \theta(t)\varphi(j))^2$$

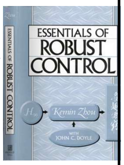
# δ(t)参数辨识过程




# Some Key References


- S. X. Ding. Model-Based Fault Diagnosis Techniques -Design Schemes, Algorithms and Tools, 2nd Edition. Springer-Verlag, London, 2013.
- S. X. Ding. Data-Driven Design of *Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control Systems. Springer-Verlag, London, 2014*.
- S. X. Ding, Y. Yang, Y. Zhang, and L. Li. Data-driven realization of kernel and image representations and their application to fault detection and control system design. Automatica, 50:2615—2623, 2014.
- S. X. Ding, Application of Factorization and Gap Metric Techniques to Fault Detection and Isolation, Part I and Part 2, IFAC Conference, 2015.
- T. Koenings, M. Krueger, H. Luo, S. X. Ding，A Data-Driven Computation Method for the Gap Metric and the Optimal Stability Margin, IEEE Transactions on Automatic Control, 2017 (online version).
- T. T Georgiou. On the computation of the gap metric. Syst. contr. letters, 11:253—257, 1988.
- T. T Georgiou and M. C. Smith. Optimal robustness in the gap metric. IEEE Trans. AC, 35:673—686, 1990.
- G. Vinnicombe. Uncertainty and Feedback: Hinf Loop-Shaping and the V-Gap Metric. World Scientific, 2000.
- K. Zhou. Essentials of Robust Control. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1998.
- 周克敏，鲁棒控制：回顾与展望，（黄琳院士主编《中国学科发展战略:控制科学》第十二章），科学出版社, 2015。
- K. Zhou and Z. Ren, “A New Controller Architecture for High Performance, Robust, Adaptive, and Fault Tolerant Control,” IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 46, No. 10, pp. 1613-1618, October 2001.
- K. Zhou, “A New Approach to Robust and Fault Tolerant Control," ACTA Automatica Sinca, Vol. 31, No. 1, pp. 43-55, 2005.

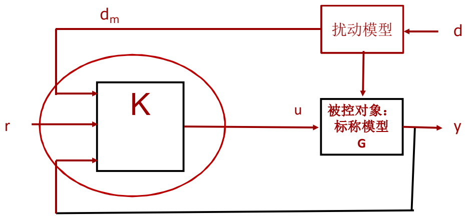

# 控制一般结构

$G = M^{-1}N$ 左互质分解，$K_0 = V^{-1}U$ 镇定控制器

$$u = K_d d_m + K_r r + K_y y$$

$$K = \begin{bmatrix} K_d & K_r & K_y \end{bmatrix} = (V - QN)^{-1}[Q_d \quad Q_r \quad -(U + QM)]$$

$S = \{K:\ Q_d, Q_r, Q \text{ all stable proper}\}$




# 鲁棒控制一般结构综合问题

解决鲁棒与性能的矛盾需要更一般控制框架：

$G = M^{-1}N$ 左互质分解(观测器)，　$K_0 = V^{-1}U$ 镇定控制器

希望找到系统的方法：设计$K_0$，$\boldsymbol{F}$和$\boldsymbol{W}$，以达到最好的性能

设计$\boldsymbol{Q}$来达到鲁棒性。

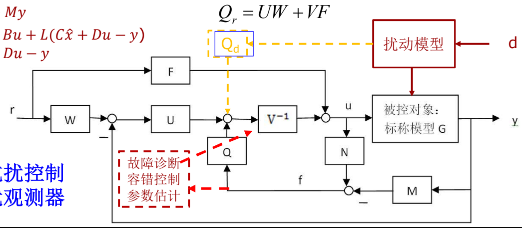
$$K = \begin{bmatrix} K_d & K_r & K_y \end{bmatrix} = (V - QN)^{-1}[Q_d \quad Q_r \quad -(U + QM)] \in S$$

$f = Nu - My$

$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(C\hat{x} + Du - y)$

$f = C\hat{x} + Du - y$

$Q_r = UW + VF$

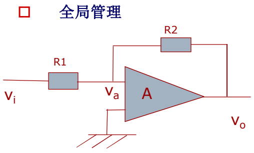



特例：
自抗扰控制
干扰观测器

# 对学科思考

**控制科学**

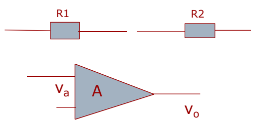
- 系统理论
- 全局管理




闭环思维 $\dfrac{V_o}{V_i} = \dfrac{A}{1 + \dfrac{R_1}{R_2}(1 - A)} \approx -\dfrac{R_2}{R_1}$

**其它工程科学**

- 个体（元件）特性
- 码农




开环思维

**中医**

- 整体健康
- 由表及里，望闻问切，。。。

**西医**

- 分类医疗：牙、眼、鼻。。。
- 手术、切除、基因。。。

47