

文章编号: 1000-8152(2001)02-0205-05

## 飞机余度舵机系统鲁棒故障诊断\*

张若青 沈现军 袁丽华

(北京航空航天大学自动控制系·北京, 100083)

**摘要:** 提出一种利用特征结构配置与状态反馈解耦相结合设计观测器的方法, 实现余度伺服系统的鲁棒故障诊断. 利用特征结构配置方法, 可以实现残差与结构性干扰解耦; 利用对偶原理, 进行解耦观测器设计, 可使残差不受交联作用影响. 利用两种方法中参数设计的自由度, 使其互相逼近, 做到在干扰解耦的基础上, 故障最大程度地实现通道解耦. 该方法不仅适用于突变故障, 而且也适用于渐变故障和多故障的诊断.

**关键词:** 鲁棒故障诊断; 结构特征配置; 干扰解耦; 状态反馈; 故障解耦

**文献标识码:** A

## Robust Fault Diagnosis for Redundant Servo System

ZHANG Ruoqing, SHEN Xianjun and QIU Lihua

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

**Abstract:** Present a scheme of designing observer to achieve robust fault diagnosis of redundant servo system, combining eigenstructure assignment with dual theory and state-feedback. By using eigenstructure assignment, the residual is de-coupled from structured disturbance; By using dual theory and state feedback, the residual is de-coupled from interaction of other channels. On the basis of disturbance de-coupling, utilized the design freedom of observer's parameters, the fault is isolated to the greatest extent. Finally, the simulations of two redundant servo systems show the effectiveness of the scheme.

**Key words:** robust fault diagnosis; eigenstructure assignment; disturbance de-couple; state feedback; fault de-couple

### 1 引言(Introduction)

为了保证飞机的高可靠性, 现代飞机操纵系统多采用余度电液伺服舵机. 由此构成的多输入多输出系统, 不仅存在参数的时变, 而且由于各通道组成元件参数的不匹配, 通道间还存在着交联耦合作用, 因此余度舵机系统的鲁棒故障诊断有两方面含义: 一是能够准确判别系统中的随机干扰与参数变动, 即实现参数的鲁棒性, 或称故障的干扰解耦; 二是不受交联耦合作用影响, 能够准确判别故障发生的位置, 实现故障解耦. 余度舵机系统的故障诊断、故障隔离及系统重构是余度控制的关键.

基于模型的故障诊断是故障诊断的一个重要研究方向, 诊断的性能与模型的准确度密切相关. 实际系统中存在的非线性、过程噪声、干扰和参数时变等不确定性, 往往使模型的精度下降, 影响诊断的准确性. 近年来的研究主要围绕提高故障诊断的鲁棒性, 其中较为重要的鲁棒故障诊断方法有未知输入观测器方法和特征结构配置方法, 这两种方法本质上都

是未知输入解耦方法. 在未知输入解耦方法中, 将系统的建模误差、干扰等大多数未知不确定性视为结构性干扰, 或称未知输入<sup>[1-3]</sup>.

本文以双余度舵机系统为研究对象, 阐述了特征结构配置方法设计干扰解耦观测器的原理之后, 又在参数时不变假设的前提下, 说明了利用对偶原理、状态反馈解耦的条件以及实现多故障解耦观测器的原理. 然后利用两者观测器参数结构中的相似性及设计中的自由度, 使其参数互相逼近, 从而达到双余度舵机系统的鲁棒故障诊断. 仿真实验验证了该方法的有效性.

### 2 系统描述和问题的提出(System description and problem formulation)

本文以力综合双余度舵机系统为研究对象, 其系统如图 1 所示.

系统的状态方程为

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) + Fg(t), \\ y(t) &= Cx(t). \end{aligned} \quad (1)$$

\* 基金项目: 国家自然科学基金(59675020)资助项目.

收稿日期: 1999-08-30; 收修改稿日期: 2000-05-08.

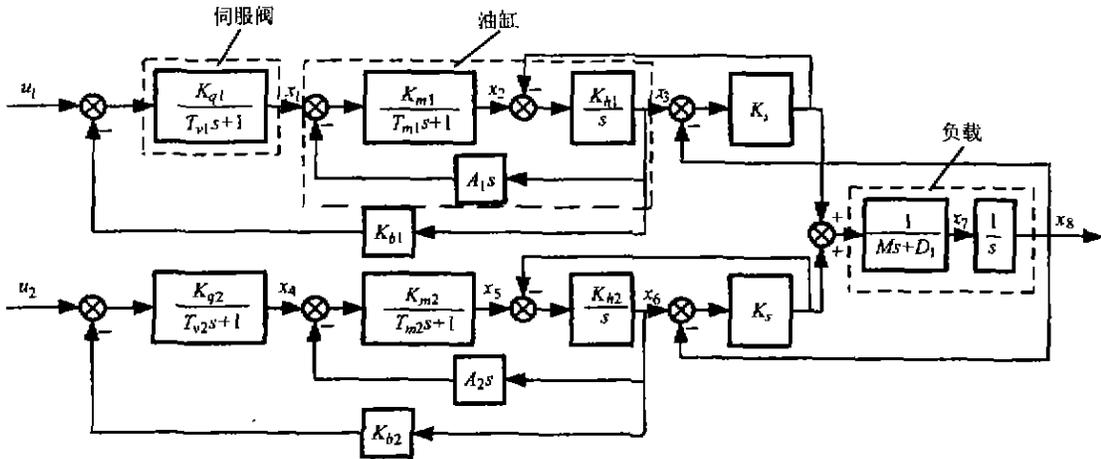


图1 冗余伺服系统结构图

Fig. 1 Structure scheme of redundant servo system

其中  $x(t) \in \mathbb{R}^n, y(t) \in \mathbb{R}^m, u(t) \in \mathbb{R}^r$  分别为系统的状态向量、测量输出向量和输入向量,  $E \in \mathbb{R}^{n \times q}$  为已知的结构性干扰分布阵,  $F \in \mathbb{R}^{n \times l}$  为系统故障分布矩阵,  $d \in \mathbb{R}^q, g \in \mathbb{R}^l$  分别表示未知输入向量和故障向量。

鲁棒故障残差观测器原理如图2所示。

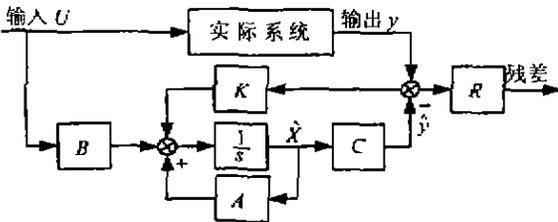


图2 观测器原理图

Fig. 2 Observer scheme

观测器状态方程为:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= (A - KC)\hat{x}(t) + Bu(t) + Ky(t), \\ \hat{y}(t) &= C\hat{x}(t). \end{aligned} \quad (2)$$

定义故障残差

$$\begin{aligned} r(t) &= R(y(t) - \hat{y}(t)), \\ r(t) &\in \mathbb{R}^l, \end{aligned}$$

则

$$r(s) = RC(sI - (A - KC))^{-1}(Ed(s) + Fg(s)), \quad (3)$$

可见,故障残差与干扰和故障均有关系,即使  $g(s) = 0$ , 故障残差也不为零。

### 3 利用特征结构配置实现干扰解耦 (Disturbance de-couple by using eigenstructure assignment)

为使干扰对故障残差没有影响, 应使

$$W_d(s) = RC(sI - (A - KC))^{-1}E = 0. \quad (4)$$

上式成立的条件为

$$1) RCE = 0; \quad (5)$$

2)  $RC$  的所有行是  $(A - KC)$  相应特征值的左特征向量, 或  $E$  的所有列是  $(A - KC)$  相应特征值的右特征向量。

本文采用右特征向量配置方法<sup>[1]</sup>, 即在满足条件  $\text{rank}(A_p) = \text{rank}(CE) = \text{rank}(E) = q$  的情况下, 有:

$$K = A_p(CE)^+ + K_1(I_m - (CE)(CE)^+), \quad (6)$$

其中

$A_p = ((A - \beta_1 I)e_1 \cdots (A - \beta_i I)e_i \cdots (A - \beta_q I)e_q) = AE - EA$ ,  $A$  为对角矩阵, 对角元素为  $\beta_i, i = 1, \dots, q, (CE)^+$  表示  $(CE)$  的伪逆,  $K_1$  为相容维数矩阵, 当  $\text{rank}(CE) = q$  时,

$$(CE)^+ = [(CE)^T CE]^{-1}(CE)^T.$$

关于条件  $\text{rank}(A_p) = \text{rank}(CE) = \text{rank}(E) = q$ , 它的含义是: 测量阵  $C$  中线性无关行的数目不小于矩阵  $E$  中线性无关列的数目, 也就是说, 最大可解耦的干扰数目不能大于线性无关的测量量的数目, 这既表明了利用特征结构配置进行干扰解耦的必要条件, 也给出了最大可解耦干扰的数目与测量阵结构的关系。

### 4 利用对偶原理及状态反馈实现的故障解耦 (Faults de-couple by using dual theory and state feedback)

对于冗余度伺服系统而言, 在将其视为一个复杂单系统时, 故障解耦包括通道间的故障解耦可看作单系统的多故障解耦问题。

在不考虑系统不确定性影响时, 观测器方程及故障残差为:

$$\begin{aligned} e(t) &= (A - KC)e(t) + Fg(t), \\ e(t_0) &= x_0 - \hat{x}_0, \quad r = RCe(t), \end{aligned} \quad (7)$$

$e(t_0)$  为初始状态估计误差. 故障解耦的目的即是设计  $R$  与  $K$ , 使故障残差向量  $r_i$  只受第  $i$  个故障影响.

对于线性时不变系统(1), 在全阶观测器(2)的状态估计初始误差为 0 时, 利用其对偶系统的静态反馈, 可获得如下解耦条件<sup>[4]</sup>:

**定理 4.1** 设  $D$  为左可逆,  $R$  和  $K$  分别如下式所示时, 式(2)定义的观测器能够使  $l$  个故障解耦<sup>[4]</sup>.

$$\bar{K} = (A^{\rho_1} f_1, A^{\rho_2} f_2, \dots, A^{\rho_l} f_l - FA) D^+ + Z_1(I - DD^+), \quad (8)$$

$$\bar{R} = WD^+ + Z_2(I - DD^+), \quad (9)$$

其中  $D = (CA^{\rho_1-1} f_1, CA^{\rho_2-1} f_2, \dots, CA^{\rho_l-1} f_l)$  为检测矩阵,  $\rho_i = 1, i = 1, \dots, l$  是与  $f_i$  相关的故障检测性指标<sup>[4]</sup>,  $Z_1$  与  $Z_2$  为任意相容维数的矩阵,  $W$  是任意非奇异对角阵,  $A$  是对角元素可配置的对角阵. 可以证明, 在状态初始估计误差不为 0 的情况下, 为使观测器达到渐近检测和隔离故障的目的,  $A$  的元素应为  $(A - KC)$  的特征值, 观测器的特征值均具有负实部, 且故障可检测性指标  $\rho_i = 1, i = 1, \dots, l$ .

## 5 特征结构配置与对偶原理的结合 (Combination of eigenstructure assignment and dual theory)

结构特征配置是在将系统参数的时变性、线性化误差及其它不确定因素归结为结构性干扰的前提

下讨论干扰对故障残差的影响, 而对偶原理是在线性时不变的前提下讨论故障的解耦问题, 那么两者结合, 可做到实际系统的鲁棒故障诊断.

由式(6)和(8)、(9)可知, 两者观测器的参数设计中均存在着设计的自由度, 即对角阵  $A$  及  $K_1, Z_1, W, Z_2$  元素的选择在满足观测器稳定性的前提下具有一定的任意性, 因此, 从理论上讲, 可通过选择  $A, K_1, Z_1, W$  与  $Z_2$ , 使  $\|K - \bar{K}\|_F \rightarrow \min$  和  $\|R - \bar{R}\|_F \rightarrow \min$ , 做到两者的相互逼近, 达到干扰与故障同时解耦的目的.

值得注意的是, 对基于特征结构配置设计的观测器, 将  $A_\beta$  表达式代入式(6), 得

$$K = (AE - EA)(CE)^+ + K_1(I - (CE)(CE)^+), \quad (10)$$

而状态反馈实现的解耦观测器, 当满足故障渐近解耦的条件并带入检测阵的具体表达式时, 式(8)成为

$$\bar{K} = (AF - FA)(CF)^+ + Z_1(I - (CF)(CF)^+). \quad (11)$$

(10)、(11)两式的结构是相同的, 即第一部分满足设计的基本条件, 第二部分主要配置观测器其余的极点. 实际应用中, 为简化设计, 令  $K_1, Z_1$  为零, 通过选取两个对角阵的元素, 使二者相互做到逼近, 并满足观测器稳定的条件.

## 6 仿真结果 (Simulation results)

对图 1 所示系统,

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_{v1}} & 0 & \frac{-K_{b1}K_{q1}}{T_{v1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_{m1}}{T_{m1}} & \frac{-(A_{11}^2 K_{b1} K_{m1} + 1)}{T_{m1}} & \frac{K_q A_{11} K_{b1} K_{m1}}{T_{m1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-K_q A_{11} K_{b1} K_{m1}}{T_{m1}} \\ 0 & K_{b1} A_{11} & -K_{b1} K_s & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_{b1} K_s \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{T_{v2}} & 0 & \frac{-K_{b2} K_{q2}}{T_{v2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{K_{m2}}{T_{m2}} & \frac{-(A_{12}^2 K_{b2} K_{m2} + 1)}{T_{m2}} & \frac{K_q A_{12} K_{b2} K_{m2}}{T_{m2}} & 0 & \frac{-K_q A_{12} K_{b2} K_{m2}}{T_{m2}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{b2} A_{12} & -K_{b2} K_s & 0 & K_{b2} K_s \\ 0 & 0 & \frac{K_s}{M} & 0 & 0 & \frac{K_s}{M} & \frac{-D_1}{M} & \frac{-2K_s}{M} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{K_{q1}}{T_{v1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{K_{q2}}{T_{v2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

其中取  $T_{v1} = 1/628.34$ ,  $K_{h1} = 0.5$ ,  
 $K_{b1} = 1$ ,  $K_{q1} = 22.5$ ,  
 $K_{m1} = 28.612$ ,  $T_{m1} = 0.011698$ ,  
 $T_{v2} = 0.8T_{v1}$ ,  $K_{h2} = 0.95K_{h1}$ ,  
 $K_{b2} = 0.9K_{b1}$ ,  $K_{q2} = 1.2K_{q1}$ ,  
 $K_{m2} = 0.6K_{m1}$ ,  $T_{m2} = 0.8T_{m1}$ ,

$A_{i1} = A_{i2} = 1.7593$ ,  $K_s = 70000$ ,  
 $D_1 = 10$ ,  $M = 2$ .

仅考虑系统液压参数  $K_q, K_m, T_m$  的时变特性, 采用奇异值分解技术获得  $E$  阵<sup>[2,3]</sup>, 其中  $q = 2$ . 仅讨论双故障情况, 则  $l = 2$ . 故障均设为两通道的位置传感器故障, 干扰分布阵与故障分布阵分别为

$$E = \begin{bmatrix} -256.42 & -1.74 \times 10^9 & 0 & -259.66 & -1.96 \times 10^9 & 0 & 0 & 0 \\ 503.10 & 1.13 \times 10^{10} & 0 & -399.94 & -1.0 \times 10^{10} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T,$$

$$F = \begin{bmatrix} -1.41 \times 10^4 & 8.56 \times 10^7 & -3.50 \times 10^4 & 0 & 0 & 0 & 3.50 \times 10^4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1.91 \times 10^4 & 6.10 \times 10^7 & -3.33 \times 10^4 & 3.50 \times 10^4 & 0 \end{bmatrix}^T.$$

以特征结构配置方法设计干扰解耦观测器,  $\Lambda$  的选择主要满足观测器的稳定, 取  $\Lambda_1 = -1000$ ,  $\Lambda_2 = -1000$ , 则

$$K = \begin{bmatrix} 0.0001 & -1.24 \times 10^3 & 0.8797 & -3.0 \times 10^{-5} & -0.0001 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 3.20 \times 10^4 & 1 & 0 & 1.90 \times 10^3 & 9.04 \times 10^4 & 83.29 \\ -6.0 \times 10^{-5} & -0.0002 & 0 & 5.0 \times 10^{-5} & -639.82 & 0.8357 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -3.23 \times 10^4 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

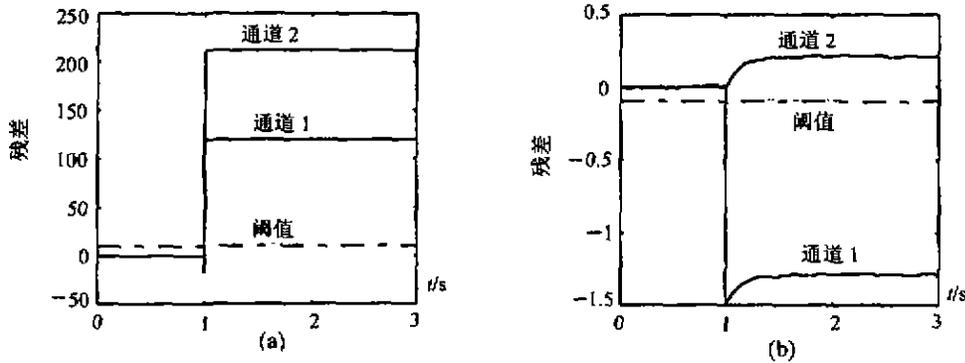


图3 单通道故障仿真曲线

Fig. 3 Simulation curves of single channel

在未知输入设为交变信号的情况下对系统进行仿真. 图3所示为突变故障诊断情况, 在1秒时通道1发生突变故障, 图3(a)中残差信号均大于阈值, 表明系统故障残差能够检测出故障, 即干扰解耦的效果很好. 但是由于存在通道耦合作用, 两个通道的故障残差均超过阈值, 因此仅从故障残差上无法判别故障发生的位置, 即不能实现故障解耦.

对于冗余伺服系统而言, 通道间的耦合作用主要是由通道间差异引起, 通道间差异亦可作为结构性干扰考虑, 因此设计时以干扰解耦观测器为基础, 使其参数逼近通道解耦观测器.

利用对偶原理设计解耦观测器, 同时使前述观测器逼近该观测器参数, 得  $\Lambda_1 = -3124.4$ ,  $\Lambda_2 = -3155.4$ , 按逼近方法重新设计的参数为

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} 0.0102 & 3.09 \times 10^4 & 0.8797 & -0.0043 & -104.57 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0048 & -104.57 & 0 & 0.0081 & 3.15 \times 10^4 & 0.8357 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\bar{R} = \begin{bmatrix} 1.20 \times 10^{-7} & 0.50 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.6 \times 10^{-7} & 0.50 \end{bmatrix}.$$

仿真结果如图 3(b), 在故障发生时刻, 通道 2 的故障残差虽然也有一定变化, 但数值相对较小, 通过合理选择阈值, 可对故障正确做出判断.

图 4(a) 为渐变故障诊断情况, 通道 1 为渐变故障发生通道. 图 4(b) 为双通道同时发生突变故障的诊断情况. 可以看出, 通过合理设置阈值, 可准确判断故障发生的位置.

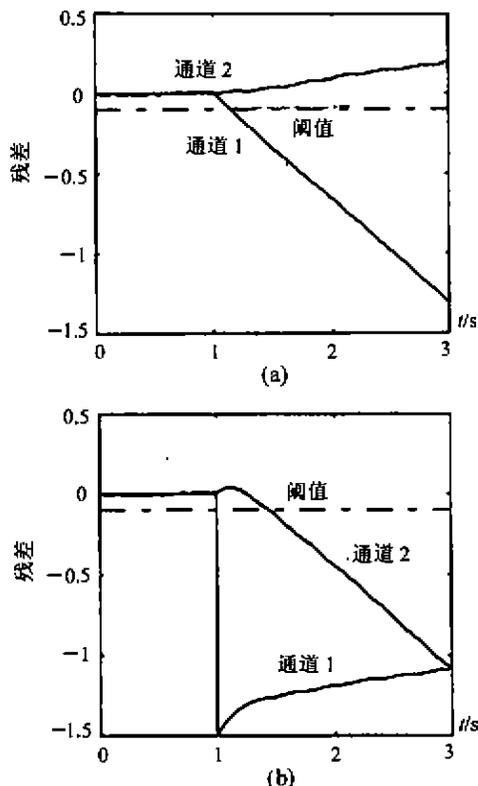


图 4 单通道渐变故障与双通道双突变故障仿真曲线  
Fig. 4 Simulation curves of ramp fault of single channel and double abrupt faults of double channels

需要说明的是, 在观测器设计时, 很难同时满足结构特征配置与状态反馈解耦条件, 也即在进行参数逼近时往往存在一定的误差, 这种参数误差与观测器状态初始估计误差一起, 可作为阈值制定的依

据, 有关这方面的研究涉及到阈值理论, 有待进一步研究.

## 7 结论(Conclusion)

由于余度伺服系统的特殊性, 参数的不匹配及不确定性影响均可视为干扰, 因此, 本文以特征结构配置方法设计的观测器为出发点, 逼近利用对偶原理及状态反馈实现的故障解耦观测器, 在干扰解耦的基础上, 最大程度地实现故障解耦. 通过对力综合双余度伺服系统的仿真表明, 合理设置阈值, 能够及时检测出故障并进行故障定位. 该方法不仅能够诊断突变故障, 而且对渐变故障及双通道多故障的诊断也有一定效果.

## 参考文献(References)

- [1] Patton R J and Chen J. Robust fault detection using eigenstructure assignment: a tutorial consideration and some new results [A]. Proceeding of the 30th Conference on Detection and Control [C], Brighton, England, December, 1991, 2242 - 2247
- [2] Patton R J and Chen J. Robust fault detection of jet engine sensor systems using eigenstructure assignment [J]. Journal of Guidance and Dynamics, 1992, 15(6): 1491 - 1497
- [3] Patton R J and Chen J. Optimal unknown input distribution matrix selection [J]. Automatica, 1993, 29(4): 837 - 841
- [4] Liu Binfan and Si Jennie. Fault isolation filter design for linear time-invariant systems [J]. IEEE Transaction on Automatic Control, 1997, 42(5): 704 - 707

## 本文作者简介

张若青 1968 年生. 讲师. 1989 年毕业于北京航空航天大学自动控制系, 1992 年于哈尔滨工业大学动力工程系获硕士学位. 毕业后于北方工业大学任教, 现在北京航空航天大学攻读博士学位. 研究方向为机电控制, 液压系统故障诊断.

沈现军 1971 年生. 1997 年硕士毕业于太原工业大学, 现于北京航空航天大学攻读博士学位. 研究方向为系统辨识, 故障诊断.

袁丽华 1935 年生. 博士生导师. 1958 年毕业于北京航空学院. 研究方向为机电控制, 故障诊断.