张育林　李东旭　著

动态系统故障诊断理论与应用

国防科技大学出版社

动态系统故障诊断理论与应用

张育林　李东旭　著

国防科技大学出版社
·长沙·

图书在版编目(CIP)数据

动态系统故障诊断理论与应用/张育林;李东旭著.—长沙:国防科技大学出版社,1997.12

ISBN 7-81024-468-X

Ⅰ.动态系统故障诊断理论与应用

Ⅱ.张育林　李东旭

Ⅲ.①故障诊断②动态系统

Ⅳ.TP277

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4505241　　邮政编码:410073

E-mail:gfkdcbs@public.cs.hn.cn

责任编辑:罗　青　　责任校对:何　晋

新华书店总店北京发行所经销

湖南大学印刷厂印装

*

850×1168　1/32　印张:10　字数:251千

1997年12月第1版第1次印刷　印数:1—1000册

*

定价:18.00元

内 容 简 介

本书系统讲述了动态系统故障诊断的理论方法及相关的基础知识。主要内容包括动态系统故障检测与诊断的基本概念和数学基础;误差检测与信号冗余技术;统计检测与广义似然比方法;奇偶空间方法;基于参数辨识的检测与诊断方法;多重模型检测方法;模式识别方法与人工神经元网络方法,以及故障诊断理论在液体火箭推进系统中的应用。

本书为从事动态系统故障诊断理论分析与工程应用的研究人员提供技术参考,也可供有关院校的研究生作为教学参考。

前　言

动态系统故障诊断技术是正在迅速发展的研究领域。由于故障状态所引起的灾难性事故及其所造成的生命与财产的巨大损失以及对环境的严重破坏等，使得人们对诸如航空航天飞行器、核电站、热电厂以及大型化工装置等动态系统的可靠性、安全性提出了越来越高的要求。除了在设计与制造阶段，通过改进可靠性设计、研究和应用新材料、新工艺以及加强生产过程的质量控制等技术措施提高系统的可靠性与安全性外，提高系统可靠性与安全性的另一个重要途径就是对系统的运行过程进行实时的故障检测与诊断，从而实现容错控制并对灾难性故障进行预警和采取相应的故障控制措施。动态系统故障诊断理论就是为了满足对系统的可靠性和安全性的高要求及减少并控制灾难性事故而发展起来的。故障诊断理论的发展必将促进故障监测与监控系统的广泛应用，从而大大提高系统运行的可靠性与安全性并产生重大的经济和社会效益。

故障诊断理论的研究目的在于研究与发展故障的检测、识别、定位及故障效应评估的一般方法与技术，其核心是提供各种解析冗余，提高诊断算法的实时性、适应性，降低错误概率。随着应用范围的不断扩大，动态系统故障诊断理论已成为面向许多领域的技术基础，形成了涉及自动控制、模式识别、人工智能、信号处理、传感器技术和计算机技术等的综合性应用学科。随着动态系统故障诊断理论的研究与应用在不同学科领域的不断发展，需要一本描述动态系统故障诊断的基本理论与方法的专门著作，以满足不同领域的技术工作者的共同需要。本书的目的就是为动态系统故障诊断理论与方法的研究和应用提供一个自包容的理论与方法基

础。

动态系统故障诊断理论的基本方面涉及很多学科领域，而故障诊断的理论与方法又在迅速发展，本书不可能包括动态系统故障诊断的理论与方法的所有方面，书中材料的选择仅限于主要的基本方法及其相关的理论基础。全书共分九章，第一章介绍了动态系统故障检测与诊断的基本概念和数学基础，第二章至第八章分别讨论了动态系统故障检测与诊断的主要理论与方法，第九章是一个应用实例，给出了液体火箭发动机故障检测与诊断的若干研究结果。本书第一、二、三、四、六、九章由张育林执笔，第五、七章由李东旭执笔，第八章由张育林、吴建军执笔。本书为从事动态系统故障诊断理论分析和工程应用的研究人员提供参考，也可供有关院校的研究生作为参考教材。书中的部分内容曾经被作为国防科学技术大学航天技术系有关专业的博士研究生和硕士研究生课程的讲授内容。

由于作者水平有限，难免有欠妥之处，敬请读者批评指正。

作者

1997 年 6 月于国防科学技术大学

目　　录

第四章　奇偶空间检测方法

第五章　基于参数的检测与诊断

第六章　多重模型检测方法

第七章　模式识别方法

第八章　神经网络方法

第九章　航天推进系统故障检测与诊断

第一章　基本概念与数学基础

1.1　动态系统的故障及描述

现代大型复杂系统，如核电站、航天飞行器等，其造价十分昂贵，并且一旦发生运行事故，就会造成极大的经济损失、政治影响和对环境造成重大破坏。因此，对这类大型系统的运行可靠性与安全性具有很高要求。另一方面，在人们的日常生活中，诸如空气调节器、电冰箱等家用电器和汽车、电梯等工业品，其可靠性和安全性也是非常重要的。系统的可靠性可以通过可靠性设计和制造过程的质量控制而加以提高，但是，由于材料的缺陷，制造的误差和运行环境的影响等干扰因素的存在以及疲劳、老化等效应的不可避免，系统运行过程中的故障和损坏实际上是不可避免的。因此，对系统的运行状态进行检测与诊断，从而对系统的故障进行预报并采取相应的控制措施，就成为提高其可靠性与安全性的重要手段。

1.1.1　系统与故障

将核电站、飞行器等大型装置称为系统，这类系统都是由相互联系的部件和部分组合而成的。系统在运行过程中所表现出来的总体性能和行为特征是由组成系统的各部件或部分的共同作用的结果。系统可以是人造的，例如宇宙飞行器、汽车、大型火力发电厂等等；也可以是天然的，例如天气系统、生态系统等等。

在研究系统的运行情况时主要关心它的状况和性能，一般并

不关心其结构构造。因此,通常用系统的运行状况的量来描述系统。我们将系统的状况称为系统的状态。动态系统的状态是时间的函数。通常用状态变量来描述动态系统的状态。状态变量记为$x_1(t),x_2(t),\cdots,x_n(t)$,这是确定系统状态数目最小的一组变量,由状态变量作为分量所构成的向量称为状态向量。描述状态向量运动规律的数学方程也就描述了系统的运行状态。在研究系统的一般运行规律时,也将这组数学方程称为系统。在本书的论述中,动态系统就是指描述系统运行状态的数学方程组。

故障是指系统由于某个部分功能的降低或结构的破坏所造成的系统状态。因此,系统的故障可以表现为系统运行性能的降低,或者系统的灾难性破坏,例如爆炸、燃烧等。系统的状态通常是通过敏感元件来感知的,这些敏感元件通常称为传感器或仪表。用于感知系统运行状态的仪表本身也可能发生故障而给出错误的信号,将这种故障称为仪表故障,而将系统部件所引起的故障称为部件故障。

按照故障状态发展的速度,可以把故障划分为快速故障与慢速故障。系统由于结构的剧烈破坏而发生的故障可以在数十毫秒或更短的时间内产生灾难性的后果,这类故障称为快速故障。由于系统部件的损坏而引起的系统性能的降低通常经过一个时间历程而发展为快速故障或使系统处于一个稳定的故障状态,这类故障称为慢速故障。动态系统故障诊断主要研究这类慢速故障,这是因为只有这类慢速故障才能在稳定的运行状态中反应出来,从而使得故障诊断与控制成为可能。其次,快速故障往往是由慢速故障的发展变化而形成的,对慢速故障的诊断与控制也就实现了对快速故障的早期诊断与预报。本书对于动态系统故障诊断的研究内容主要限定在故障引起的系统运行性能的退化上。

1.1.2　数学模型

描述系统运行过程的数学方程组称为系统的数学模型。动态系统的数学模型是一组微分方程，它描述系统状态变量的时间历程。本书主要研究线性时不变系统的故障检测与故障诊断问题。线性时不变动态系统的数学模型可以用一组定常系数的微分方程来描述。根据数学模型的表达方法，把系统的数学模型表述成状态空间形式或输入输出形式。

状态空间形式的系统数学模型是一组一阶微分方程组。对于线性时不变系统，其状态空间形式的数学模型为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) + Ff(t) \tag{1-1}$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + Gd(t) + Hf(t) \tag{1-2}$$

其中，$x \in R^n$ 为状态向量，$u \in R^r$ 为输入向量，$d \in R^p$ 为干扰向量，$f \in R^q$ 为故障向量，$y \in R^m$ 为输出向量，A,B,C,D,E,F,G,H 为具有相应维数的矩阵。

状态空间形式的系统模型描述了系统的内部工作过程，并且直接给出了系统状态的变化规律，反映了系统的内在运行规律。但是，系统的状态变量常常是不可能完全测量的，因而利用系统的输入和输出之间的关系来描述系统的运行过程有较大的方便性。描述系统输入输出关系的数学方程称为系统的输入－输出形式的数学模型。线性时不变系统的输入输出形式的数学模型的形式为：

$$A(p)y(t) = B(p)u(t) + G(p)d(t) + H(p)f(t) \tag{1-3}$$

其中 p 代表微分算子，$A(p)$、$B(p)$、$G(p)$、$H(p)$为具有相应维数的微分算子 p 的函数矩阵。输入输出形式的系统方程通常用其频域形式来表示，即

$$y(s) = G_u(s)u(s) + G_d(s)d(s) + G_f(s)f(s) \tag{1-4}$$

其中，$G_u(s)$为系统的输入传递函数，$G_d(s)$为系统的干扰传递函数，$G_f(s)$为系统的故障传递函数。频域方程式(1-4)是时域方程式

(1-3)的 Laplace 变换，对于单输入单输出系统，有

$$G_u(s) = \frac{B(s)}{A(s)}$$

$$G_d(s) = \frac{G(s)}{A(s)}$$

$$G_f(s) = \frac{H(s)}{A(s)}$$

对系统的状态方程式(1-1)和式(1-2)进行 Laplace 变换，也可以得到如式(1-4)所示的频域方程，这时

$$G_u(s) = C(sI - A)^{-1}B + D$$

$$G_d(s) = C(sI - A)^{-1}E + G$$

$$G_f(s) = C(sI - A)^{-1}F + H$$

状态方程式(1-1)、(1-2)和输入输出方程式(1-3)均是用微分方程来描述系统的运行过程。在系统理论中，将用微分方程描述的系统称为连续时间系统。由于计算机控制技术和数值分析技术的发展和应用，利用按一定时间间隔来采集的系统的各种变量的值来描述系统的运行过程具有较大的方便性。对应于微分方程形式的系统方程，可以用差分方程来描述系统离散变量的各种数学关系。用差分方程描述的系统称为离散时间系统。离散时间系统的状态空间方程为

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Ed(k) + Ff(k) \qquad (1\text{-}5)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) + Gd(k) + Hf(k) \qquad (1\text{-}6)$$

其中，$x(k)$，$u(k)$，$y(k)$，$d(k)$，$f(k)$分别为向量 $x(t)$，$u(t)$，$y(t)$，$d(t)$，$f(t)$在时刻 $t=k\Delta t(k=0,1,2,\cdots)$的采样值，$\Delta t$ 表示采样周期或时间步长。离散时间系统的输入输出方程可以写成

$$A(q^{-1})y(k) = B(q^{-1})u(k) + G(q^{-1})d(k) + H(q^{-1})f(k) \qquad (1\text{-}7)$$

其中 q^{-1}为滞后算子。

以上分别给出了动态系统的数学模型的状态空间形式和输入输出方程形式，两种形式的数学模型又可以根据需要利用连续时间模型或离散时间模型。在以上给出的几种数学模型中，将可以控制的输入量定义为系统输入，将不可控制的各种外界输入定义为干扰输入，而将故障效应用故障输入来加以描述。这种用故障输入的办法来描述的故障效应，主要反映了传感器故障和控制系统的作动器故障。在更复杂的情况下，故障效应将同状态变量及输入变量相耦合。

1.2　随机向量

系统的故障检测与诊断，常常需要对随机信号进行处理。这一节概要综述随机向量的有关概念与结论。

1.2.1　基本定义

随机向量 $\boldsymbol{x}$ 是由随机变量 $\boldsymbol{x}_1,\boldsymbol{x}_2,\cdots,\boldsymbol{x}_n$ 作为分量构成的向量，也即

$$\boldsymbol{x} = (\boldsymbol{x}_1,\boldsymbol{x}_2,\cdots,\boldsymbol{x}_n)^T$$

将随机向量 $\boldsymbol{x}$ 的联合分布函数定义为

$$F(x_1,x_2,\cdots,x_n) = P\{\boldsymbol{x}_1 \leqslant x_1,\boldsymbol{x}_2 \leqslant x_2,\cdots,\boldsymbol{x}_n \leqslant x_n\} \quad (1\text{-}8)$$

其中，$P\{A\}$为事件 A 的概率。将式(1-8)写成向量形式，则有

$$F(x) = P\{\boldsymbol{x} \leqslant x\} \quad (1\text{-}9)$$

联合分布函数 F 是一个对其所有变量均为非减的函数，并且满足

$$F(-\infty,-\infty,\cdots,-\infty) = 0 \quad (1\text{-}10)$$

$$F(+\infty,+\infty,\cdots,+\infty) = 1 \quad (1\text{-}11)$$

将随机向量 $\boldsymbol{x}$ 的联合密度函数定义为

$$p(x)=\lim_{\substack{\Delta x_1\to 0\\ \vdots\\ \Delta x_n\to 0}}\frac{P\{x_1<\boldsymbol{x}_1\leqslant x_1+\Delta x_1,\cdots,x_n<\boldsymbol{x}_n\leqslant x_n+\Delta x_n\}}{\Delta x_1\Delta x_2\cdots\Delta x_n}\tag{1-12}$$

显然，由随机向量的联合分布函数的定义，则有

$$p(x)=\partial^n F(x)/\partial x_1\partial x_2\cdots\partial x_n=\partial F(x)/\partial x\tag{1-13}$$

反过来，分布函数也可以由密度函数的积分而得，即

$$F(x)=\int_{-\infty}^{x}p(x)\mathrm{d}x=\int_{-\infty}^{x_1}\cdots\int_{-\infty}^{x_n}p(x)\mathrm{d}x_1\cdots\mathrm{d}x_n\tag{1-14}$$

在故障诊断分析中，条件密度函数有着重要的作用。根据给定条件的不同，把条件密度函数区分为给定事件的条件密度函数和给定随机向量的条件密度函数。

将给定事件 w 时随机向量 $\boldsymbol{x}$ 的条件分布函数定义为

$$F(x|w)=P\{\boldsymbol{x}\leqslant x|w\}\tag{1-15}$$

其中，$P\{A|B\}$是给定事件 B 已发生的条件下，事件 A 的条件概率。类似地将给定事件 w 时，随机向量 $\boldsymbol{x}$ 的条件密度函数定义为

$$p(x|w)=\partial^n F(x|w)/\partial x_1\partial x_2\cdots\partial x_n\tag{1-16}$$

当给定随机向量 $\boldsymbol{y}$ 有确定值 y 时，随机向量 $\boldsymbol{x}$ 的条件密度可以看成给定事件 w 时随机向量 $\boldsymbol{x}$ 的条件密度的特例，这时，事件 w 相当于事件$\{y<\boldsymbol{y}\leqslant y+\Delta y\}$，$\Delta y\to 0$. 因而，将给定随机向量 $\boldsymbol{y}$ 有确定值 y 时，随机向量 $\boldsymbol{x}$ 的条件密度函数定义为

$$p(x|y)=\lim_{\Delta y\to 0}p(x|y<\boldsymbol{y}\leqslant y+\Delta y)\tag{1-17}$$

1.2.2 Bayes 定理

当 m 个孤立事件 $w_1,w_2,\cdots,w_m$ 的联合是一个必然事件时，随机向量 $\boldsymbol{x}$ 的密度函数为

$$p(x)=\sum_{i=1}^{m}p(x|w_i)P\{w_i\}\tag{1-18}$$

对条件密度函数，容易证明

$$p(x|y)=\frac{p(x,y)}{p(y)} \tag{1-19}$$

其中 $p(x,y)$ 为随机向量 $\boldsymbol{x}$ 和 $\boldsymbol{y}$ 的所有分量的联合密度函数，$p(y)$ 是随机向量 $\boldsymbol{y}$ 的边缘密度函数，也即

$$p(x,y)=p(x_1,x_2,\cdots,x_n,y_1,y_2,\cdots y_m) \tag{1-20}$$

$$p(y)=\int_{-\infty}^{+\infty}p(x,y)\mathrm{d}x \tag{1-21}$$

由式(1-19)，可以得到

$$\begin{aligned}p(x,y)&=p(x|y)p(y)\\&=p(y|x)p(x)\end{aligned}$$

由此可得 Bayes 定理的表达式

$$p(x|y)=\frac{p(y|x)p(x)}{p(y)} \tag{1-22}$$

Bayes 定理在估计理论中起着至关重要的作用。利用事件 w_i 代替式(1-22)中的 y，则可以得到作为假设检验基础的 Bayes 定理的推广形式，即

$$p(x|w_i)=\frac{P(w_i|x)p(x)}{P(w_i)} \tag{1-23}$$

例 1.1　设 $\boldsymbol{x}$ 和 $\boldsymbol{m}$ 为两个随机变量，$\boldsymbol{m}$ 的边缘分布是正态的，期望值为 m_0，方差为 σ_m^2，当 $\boldsymbol{m}$ 取给定值 m 时，$\boldsymbol{x}$ 的条件密度为

$$p(x|m)=\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}}e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}$$

利用 Bayes 定理计算 x 给定时 m 的条件密度，则有

$$p(m|x)=\frac{p(x|m)p(m)}{p(x)}$$

由于

$$p(x)=\int_{-\infty}^{+\infty}p(x|m)p(m)\mathrm{d}m$$

因此

$$p(m|x)=\frac{p(x|m)p(m)}{\int_{-\infty}^{+\infty}p(x|m)p(m)\mathrm{d}m}$$

$$=\frac{(2\pi)^{-1}\sigma^{-1}\sigma_m^{-1}\exp[-\frac{1}{2}\{(x-m)^2/\sigma^2+(m-m_0)^2/\sigma_m^2\}]}{\int_{-\infty}^{+\infty}(2\pi)^{-1}\sigma^{-1}\sigma_m^{-1}\exp[-\frac{1}{2}\{(x-m)^2/\sigma^2+(m-m_0)^2/\sigma_m^2)\}]\mathrm{d}m}$$

$$=\frac{(\sigma^2+\sigma_m^2)^{1/2}}{(2\pi)^{1/2}\sigma\sigma_m}\exp[-\frac{1}{2}\cdot\frac{\sigma^2+\sigma_m^2}{\sigma^2\sigma_m^2}(m-\frac{x\sigma_m^2+m_0\sigma^2}{\sigma^2+\sigma_m^2})^2]$$

1.2.3 数学期望与方差

利用随机向量的分布参数来描述随机向量有着比分布函数或密度函数更为简便直观的优点。

将随机向量 $\boldsymbol{x}$ 的期望向量定义为

$$\bar{x}=E\{\boldsymbol{x}\}=\int_{-\infty}^{+\infty}xp(x)\mathrm{d}x \tag{1-24}$$

在给定 $\boldsymbol{y}$ 时，随机向量 $\boldsymbol{x}$ 的条件期望向量定义为

$$E\{\boldsymbol{x}|y\}=\int_{-\infty}^{+\infty}xp(x|y)\mathrm{d}x \tag{1-25}$$

期望向量是随机向量的平均向量，是描述随机向量的重要分布参数。另外，描述随机向量离散度的参数也是一组重要的分布参数。

将随机向量 $\boldsymbol{x}$ 的协方差矩阵定义为

$$Q=E\{(\boldsymbol{x}-\bar{x})(\boldsymbol{x}-\bar{x})^T\} \tag{1-26}$$

在定义式(1-26)中，若将协方差矩阵的各元素记为 $\sigma_{ij}^2(i,j=1,2,\cdots,n)$，则

$$\sigma_{ij}^2=E\{(\boldsymbol{x}_i-\bar{x}_i)(\boldsymbol{x}_j-\bar{x}_j)\}\qquad i,j=1,2,\cdots,n \tag{1-27}$$

显然，协方差矩阵的对角元素为相应随机变量的方差，非对角元素是两个随机变量 $\boldsymbol{x}_i$ 和 $\boldsymbol{x}_j$ 的协方差。由式(1-26)可以得到

$$Q=E\{\boldsymbol{x}\boldsymbol{x}^T\}-E\{\boldsymbol{x}\}\bar{x}^T-\bar{x}E\{\boldsymbol{x}^T\}+\bar{x}\bar{x}^T$$