

控制系统的故障检测与诊断技术

周东华 孙优贤

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 提 要

本书是控制系统的故障检测与诊断技术专著,也是国内在此领域出版的第一本专著。本书主要收录了作者近年来在非线形系统故障检测与诊断技术领域的研究成果,同时也兼顾了线性系统故障诊断技术的一些主要方法。本书可作为自动控制专业研究生的教学参考书,同时对广大的自动化研究、设计、开发人员也有一定的参考价值。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标志,无标志者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

控制系统的故障检测与诊断技术/周东华,孙优贤著. —北京:清华大学出版社, 1994

ISBN 7-302-01541-4

. 控... . 周... 孙... . 自动控制-控制系统-故障检测-故障诊断
.TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (94) 第 09943 号

出版者: 清华大学出版社 (北京清华大学校内, 邮编 100084)

印刷者: 国防工业出版社印刷厂

发行者: 新华书店总店北京科技发行所

开 本: 787×1092 1/16 印张: 18 字数: 423 千字

版 次: 1994 年 9 月 第 1 版 1994 年 9 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-01541-4/ TP · 632

印 数: 0001—3000

定 价: 22.00 元

前 言

随着现代自动化水平的日益提高,系统的规模正在日益扩大,系统的复杂性也已迅速增加,同时系统的投资也越来越大。因此人们迫切希望提高控制系统的可靠性和可维修性。而故障检测与诊断技术则为提高系统的可靠性和可维修性开辟了一条新的途径。

二十多年来,故障检测与诊断技术已得到了迅速发展。已在诸如航空、航天、核反应堆、热电厂、输油管线、机器人以及众多的工业过程中得到了广泛应用,并取得了巨大的经济效益。

故障检测与诊断技术是一门应用型的边缘学科,它的理论基础是现代控制理论、计算机工程、数理统计、信号处理、模式识别、人工智能、以及相应的应用学科。故障检测与诊断技术近年来已得到了国际自控界的高度重视,现在每年都有近百篇的论文问世。

笔者近年来一直从事控制系统故障检测与诊断技术的理论和应用研究工作,同时还开始从事这方面的研究生教学工作,感到现在非常有必要写出一本这方面的研究专著。我们深信,本书的出版必将对我国控制系统的故障检测与诊断技术的研究起到一定的推动作用。

第一章介绍了可靠性工程的基本概念,并综述了故障检测与诊断技术的发展状况,给出了故障检测与诊断技术所研究的主要问题。第二章探讨了基于模型的线性系统的故障检测与诊断方法。第三章给出了基于模型的非线性系统的故障检测与诊断方法。第四章介绍了故障诊断技术的一些专门问题。最后,第五章给出了这门技术的一些著名的应用成果。

本书作者之一周东华同志 1988 年从师上海交通大学教授张钟俊先生攻读博士学位,为本书的写作打下了扎实的理论基础。在此期间,周东华还在席裕庚教授指导下从事有关研究工作,受益匪浅。在本书正式出版之际,谨向他们表示衷心的感谢。我们还要感谢完成本书录入打印及部分作图工作的林庆同志和完成本书录入稿校核工作的朱晓东博士。本书责任编辑等为提高本书质量也付出了辛勤劳动,在此一并致谢。

由于我们理论水平有限,以及所做研究工作的局限性,书中难免有许多错误,恳请广大读者批评指正。

作者

1994 年 4 月于北京

目 录

前言	()
第一章 绪论	(1)
1.1 可靠性工程的基本概念	(1)
1.1.1 可靠性、有效性、可维修性	(1)
1.1.2 可靠度、失效率、MTTF、MTBF、维修度、修复率	(1)
1.1.3 串联系统的可靠性	(3)
1.1.4 并联系统的可靠性	(4)
1.1.5 复杂系统的可靠性	(4)
1.1.6 小结	(4)
1.2 提高控制系统可靠性的主要方法	(4)
1.2.1 提高元器件的可靠性	(4)
1.2.2 系统的高可靠性设计	(4)
1.2.3 控制系统的容错设计	(5)
1.2.4 基于故障检测与诊断技术的容错设计	(6)
1.2.5 小结	(6)
1.3 控制系统的故障检测与诊断技术概述	(7)
1.3.1 控制系统故障检测与诊断技术的主要内容	(7)
1.3.2 控制系统的故障检测与诊断技术的主要方法	(8)
1.3.3 小结	(11)
第二章 线性系统的故障检测与诊断方法	(12)
2.1 修正的序列概率比方法	(12)
2.1.1 问题的描述	(12)
2.1.2 修正的序列概率比故障检测法	(13)
2.1.3 小结	(15)
2.2 等价空间法	(15)
2.2.1 问题的引出	(15)
2.2.2 等价空间法故障诊断算法的导出	(16)
2.2.3 小结	(18)
2.3 广义似然比方法	(18)
2.3.1 问题的描述	(18)
2.3.2 广义似然比方法的导出	(19)
2.3.3 一种自适应滤波方法	(21)

2.3.4	广义似然比方法的递推算法.....	(21)
2.3.5	广义似然比方法的特殊形式.....	(22)
2.3.6	广义似然比方法的一些性质.....	(22)
2.3.7	仿真实例.....	(23)
2.3.8	小结.....	(24)
2.4	极大似然比方法.....	(25)
2.4.1	问题的引出.....	(25)
2.4.2	极大似然比方法的导出.....	(25)
2.4.3	极大似然比方法的故障分离问题.....	(27)
2.4.4	极大似然比方法的推广.....	(28)
2.4.5	示例.....	(30)
2.4.6	小结.....	(32)
2.5	检测滤波器方法.....	(32)
2.5.1	系统的描述.....	(32)
2.5.2	检测滤波器的设计.....	(33)
2.5.3	$r < m$ 时的情形.....	(38)
2.5.4	具有相同特征值的检测滤波器.....	(39)
2.5.5	检测滤波器设计举例.....	(39)
2.5.6	小结.....	(40)
2.6	参数估计方法.....	(40)
2.6.1	参数估计.....	(42)
2.6.2	过程参数的确定.....	(43)
2.6.3	故障的检测与分离.....	(44)
2.6.4	小结.....	(45)
2.7	马氏链法.....	(45)
2.7.1	问题的描述.....	(46)
2.7.2	最优解的导出.....	(46)
2.7.3	次优解的导出.....	(48)
2.7.4	仿真例子.....	(49)
2.7.5	小结.....	(52)
2.8	自适应观测器/滤波器方法.....	(52)
2.8.1	自适应观测器方法.....	(52)
2.8.2	收敛性及稳定性条件.....	(54)
2.8.3	自适应滤波器方法(一).....	(56)
2.8.4	自适应滤波器方法(二).....	(57)
2.8.5	小结.....	(63)
2.9	多重观测器/滤波器方法.....	(63)
2.9.1	奉献观测器/滤波器方法.....	(63)

2.9.2	简化的奉献观测器/滤波器方法	(65)
2.9.3	广义的奉献观测器/滤波器方法	(66)
2.9.4	互联系统的观测器方法	(67)
2.9.5	小结	(69)
2.10	参数灵敏度法	(69)
2.10.1	算法的导出	(69)
2.10.2	故障检测与分离策略	(73)
2.10.3	仿真例子	(73)
2.10.4	小结	(76)
2.11	鲁棒观测器方法	(77)
2.11.1	鲁棒观测器的结构与性质	(78)
2.11.2	鲁棒观测器的算法实现	(82)
2.11.3	小结	(87)
2.12	各种方法的比较与应用范围	(87)
第三章	非线性系统的故障检测与诊断方法	(90)
3.1	自适应非线性观测器方法	(90)
3.1.1	故障检测策略	(91)
3.1.2	小结	(92)
3.2	扩展卡尔曼滤波器方法	(92)
3.2.1	故障检测策略	(93)
3.2.2	仿真例子	(93)
3.2.3	小结	(94)
3.3	自适应扩展卡尔曼滤波器方法	(95)
3.3.1	故障检测策略	(97)
3.3.2	小结	(97)
3.4	非线性未知输入观测器方法	(98)
3.4.1	模型的描述	(98)
3.4.2	干扰解耦	(99)
3.4.3	鲁棒故障检测观测器设计	(100)
3.4.4	鲁棒故障分离策略	(102)
3.4.5	例子	(103)
3.4.6	小结	(105)
3.5	强跟踪滤波器方法	(105)
3.5.1	强跟踪滤波器理论	(106)
3.5.2	基于强跟踪滤波器方法的非线性系统的故障检测与诊断	(142)
3.5.3	小结	(155)
3.6	各种方法的比较与应用范围	(156)

第四章	控制系统故障检测与诊断的专门问题	(157)
4.1	最优阈值的确定方法	(157)
4.1.1	问题的描述	(158)
4.1.2	最优阈值的确定	(160)
4.1.3	示例	(164)
4.1.4	小结	(165)
4.2	鲁棒检测问题	(166)
4.2.1	基本的冗余关系	(167)
4.2.2	建立鲁棒冗余关系的一种几何方法	(168)
4.2.3	鲁棒冗余关系的一些推广	(171)
4.2.4	小结	(175)
4.3	可检测性与可分离性问题	(176)
4.3.1	线性系统突变性故障可检测性的充要条件	(177)
4.3.2	投影算子方法的故障可分离性	(185)
4.3.3	小结	(190)
4.4	重新初始化问题	(191)
4.4.1	问题的描述	(191)
4.4.2	偏差分离估计算法	(191)
4.4.3	重新初始化方法	(193)
4.4.4	小结	(195)
第五章	控制系统故障检测与诊断技术的应用	(196)
5.1	水翼艇传感器故障的检测与分离	(196)
5.1.1	故障模型的建立	(196)
5.1.2	奉献观测器的设计	(200)
5.1.3	故障检测与分离逻辑	(202)
5.1.4	关于系统参数变动的鲁棒性	(204)
5.1.5	两个传感器同时发生故障时的检测	(208)
5.1.6	小结	(208)
5.2	机器人故障的检测与诊断	(209)
5.2.1	机器人故障检测与诊断技术概述	(209)
5.2.2	机器人驱动系统部件故障的实时检测与诊断	(209)
5.2.3	工业机器人传感器故障的实时检测与诊断	(211)
5.2.4	数值仿真	(214)
5.2.5	小结	(216)
5.3	核电厂传感器故障的检测与分离	(217)
5.3.1	恒增益卡尔曼滤波器	(217)

5.3.2	均压器模型	(218)
5.3.3	卡尔曼滤波器的建造方法	(221)
5.3.4	故障检测与分离策略	(222)
5.3.5	仿真与实验结果	(224)
5.3.6	小结	(226)
5.4	造纸机故障的检测与诊断	(228)
5.4.1	非线性系统传感器的故障检测与诊断方法	(228)
5.4.2	造纸机传感器故障的检测与诊断	(229)
5.4.3	小结	(232)
5.5	电机拖动的离心泵系统的故障检测与诊断	(232)
5.5.1	模型的建立	(232)
5.5.2	参数估计问题	(235)
5.5.3	实验结果	(237)
5.5.4	小结	(240)
5.6	三相感应电动机的在线故障检测与诊断	(240)
5.6.1	引言	(240)
5.6.2	三相感应电动机故障模型的建立	(240)
5.6.3	故障检测与诊断方法	(242)
5.6.4	仿真研究	(243)
5.6.5	小结	(244)
参考文献.....		(247)
附录 A 故障检测与诊断技术术语汉英对照表.....		(264)
附录 B 故障检测与诊断技术应用实例一览表.....		(275)

第一章 绪 论

1.1 可靠性工程的基本概念

为更好地理解控制系统故障检测与诊断技术与可靠性工程的内在联系,本节给出一些可靠性工程的基本概念。

1.1.1 可靠性、有效性、可维修性

系统的可靠性是指系统在规定的条件下,规定的时间内完成规定功能的能力。此可靠性定义具有三个要素:规定的条件,时间和功能。系统的可靠性与规定的条件关系极大,同一系统在不同的运行条件下的可靠性是截然不同的。系统的可靠性与规定的时间也密切相关。通常,系统的可靠性将随时间的推移而降低。完成规定功能的能力是指系统完成规定的性能指标的可能性,规定的功能越强,系统的可靠性越低。

系统的有效性是指可维修系统能维持功能的能力,即系统保持良好工作状态的能力。有效性可定义为

$$\text{有效性} = \frac{\text{系统可能工作时间}}{\text{系统可能工作时间} + \text{不能工作时间}}$$

一般可以把控制系统分为可维修的与不可维修的两大类。在人能到达的地方的控制系统一般都是可以维修的或可更换的。因此,系统的可维修性定义为:系统发生故障后进行维修,能尽量恢复正常工作的能力。可维修性反映了系统维修的难易程度。它是系统的一种内在特性,由众多的因素构成,如系统的简单性、维修方便性、有充分的后勤保证能力等。

1.1.2 可靠度、失效率、MTTF、MTBF、维修度、修复率

1. 可靠度

系统的可靠度是指它在一定的时间里完成预定功能的概率。不可维修系统的可靠性可用可靠度函数定量描述。

定义 1.1.1 对于任意一时刻 $t > 0$, 系统的可靠度函数 $R(t)$ 是它正常工作时间随机变量 X 大于 t 的概率, 即

$$R(t) = P(x > t), \quad t > 0 \quad (1.1.1)$$

令 $F(t)$ 表示随机变量 X 的分布函数, $f(t)$ 表示 X 的分布密度, 则有

$$R(t) = P(x > t) = 1 - P(x \leq t) = 1 - F(t) \quad (1.1.2)$$

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(x) dx, \quad t > 0 \quad (1.1.3)$$

式中, $F(t)$ 表示系统在 $[0, t]$ 内失效的概率, 称为不可靠度; $f(t)$ 为失效密度; 可靠度 $R(t)$ 是时间 t 的函数, 它表示系统在 $[0, t]$ 内不失效的概率。显然有

$$F(t) + R(t) = 1, \quad R(t) = 1 - F(t) \quad (1.1.4)$$

$$\frac{R(t)}{t} = - \frac{F(t)}{t} = - f(t) \quad (1.1.5)$$

可靠度有如下性质

- (1) $R(t)$ 是 t 的单调递减函数
- (2) $R(0) = 1$
- (3) $\lim_{t \rightarrow +\infty} R(t) = 0$
- (4) $0 < R(t) < 1$

2. 失效率

定义 1.1.2 设系统的失效分布函数为 $F(t)$, 分布密度为 $f(t)$, 则称

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)}, \quad t \geq 0 \quad (1.1.6)$$

为系统的瞬时失效率或失效率函数(简称失效率或故障率)。

(1.1.6)式可化为

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} = - \frac{F'(t)}{1 - F(t)} = - \frac{R'(t)}{R(t)} \quad (1.1.7)$$

从失效率的定义可以看出, 它是衡量系统在某时刻单位时间内失效次数的数量指标。失效率的单位是时间的倒数。

从(1.1.7)式看到, 在可靠性工程中有四个特征量: 失效密度 $f(t)$ 、失效函数 $F(t)$ 、可靠度 $R(t)$ 和失效率 $\lambda(t)$ 。若已知其中一个, 则其它三个均可以推导出来。

3. MTTF、MTBF

设系统寿命 X 的分布函数和分布密度分别为 $F(t)$ 和 $f(t)$, $t \geq 0$, 则随机变量 X 的数学期望为

$$E(X) = \int_0^{+\infty} t f(t) dt \quad (1.1.8)$$

将(1.1.5)式代入上式得

$$E(X) = - \int_0^{+\infty} t dR(t) = - tR(t) \Big|_0^{+\infty} + \int_0^{+\infty} R(t) dt$$

假定

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} tR(t) = 0$$

有

$$E(X) = \int_0^{+\infty} R(t) dt \quad (1.1.9)$$

对于不可维修系统, 称为平均寿命, 记为 MTTF (Mean Time to Failure)。对于可维修系统, 称为平均故障间隔, 记为 MTBF (Mean Time Between Failure)。

4. 维修度、修复率

定义 1.1.3 在规定的条件下和规定的时间 $(0, t)$ 内, 系统通过维修而恢复正常状态的概率称为系统的维修度, 记为 $M(t)$ 。

若维修时间随机变量 T 的分布函数为 $m(t)$, 则有

$$M(t) = P(T > t) = \int_0^t m(t) dt \quad (1.1.10)$$

定义 1.1.4 若系统在时刻 t 处于维修状态, 则称该系统在单位时间内能修复的概率为其修复率, 记为 $\mu(t)$ 。根据其定义, $\mu(t)$ 可表示为

$$\mu(t) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{1}{t} P(T + t \leq T < T + t + \Delta t) \quad (1.1.11)$$

(1.1.11) 式亦可写成

$$\mu(t) = \frac{m(t)}{1 - M(t)}$$

显然, 可维修系统的维修度, 修复率对应于不可维修系统的可靠度与故障率。

1.1.3 串联系统的可靠性

设不可维修系统 S 由 n 个独立子系统 S_1, S_2, \dots, S_n 串联组成, 如图 1.1.1 所示。

任何一个子系统失效都会引起系统 S 的失效, 那么系统 S 的寿命 X 为

$$X = \min(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

其中, X_i 是子系统 S_i 的寿命。系统 S 的可靠度

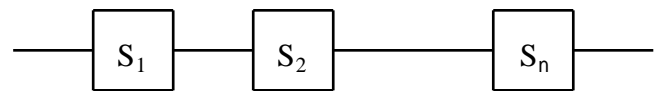


图 1.1.1 串联系统

$$\begin{aligned} R(t) &= P\{\min(x_1, x_2, \dots, x_n) > t\} \\ &= P\{(x_1 > t), (x_2 > t), \dots, (x_n > t)\} \\ &= \prod_{i=1}^n P(x_i > t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \end{aligned} \quad (1.1.12)$$

其中, $R_i(t)$ 是子系统 S_i 的可靠度。设子系统 S_i 的失效率为 $\lambda_i(t)$, 则由(1.1.7)式可求得

$$R_i(t) = e^{-\int_0^t \lambda_i(t) dt} \quad (1.1.13)$$

因此, 系统 S 的可靠度为

$$\begin{aligned} R(t) &= \prod_{i=1}^n R_i(t) = e^{-\sum_{i=1}^n \int_0^t \lambda_i(t) dt} \\ &= e^{-\int_0^t \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) dt} = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \end{aligned} \quad (1.1.14)$$

其中, $\lambda(t)$ 是系统 S 的失效率, 可表示成

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) \quad (1.1.15)$$

该式表明, 串联系统的失效率等于所有子系统失效率之和。

1.1.4 并联系统的可靠性

系统 S 为 n 个子系统的并联,如图 1.1.2 所示。

系统 S 由 n 个独立子系统 S_1, S_2, \dots, S_n 并联组成,所以,只有所有部件都失效时系统才失效。系统的寿命

$$x = \max\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$$

系统的可靠度

$$\begin{aligned} R(t) &= P(x > t) = P\{\max(x_1, x_2, \dots, x_n) > t\} \\ &= 1 - P\{(x_1 \leq t), (x_2 \leq t), \dots, (x_n \leq t)\} \\ &= 1 - \prod_{i=1}^n P(x_i \leq t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)) \end{aligned}$$

(1.1.16)

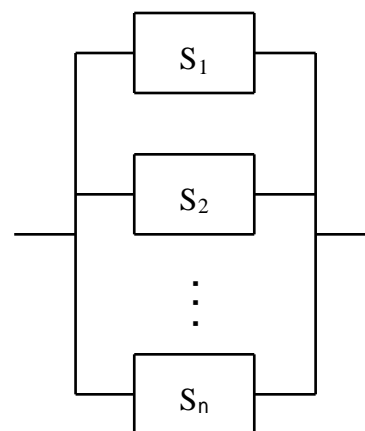


图 1.1.2 并联系统示意图

由于 $0 < 1 - R_i(t) < 1$, 因此随着并联子系统的增加,系统的可靠度将单调递增。

1.1.5 复杂系统的可靠性

实际控制系统并不局限于上述的串联或并联形式,它可能是具有串并联、并串联或更复杂的网络形式。对这样复杂系统的可靠性进行分析计算可采用最小路集法、最小割集法、网络分解法、三角形到星形的转换法等,参见[1, 2]。

1.1.6 小结

本节给出了可靠性工程的一些最基本的概念。这些基本概念是可靠性工程的基础。掌握这些基本概念对学习下节关于提高控制系统的可靠性的途径是十分重要的。

1.2 提高控制系统可靠性的主要方法

1.2.1 提高元器件的可靠性

控制系统由各子系统构成,各子系统又由众多的元部件构成。因此控制系统的可靠性在很大程度上取决于组成系统的元部件的可靠性。可以说,增强元部件的可靠性是提高系统可靠性的根本途径之一。提高元部件可靠性的主要方法有:改善屏蔽技术、选择优质材料、改革工艺水平等。

1.2.2 系统的高可靠性设计

1. 简化系统结构

由于系统结构越简单,系统中的元部件越少,系统的可靠性也就越高。因此在不影响系统基本性能的前提下,应尽量简化系统的结构。

2. 采用固定结构备份

对某些重要的子系统可以采用双重或更高重备份的办法来提高系统的可靠性。这里有两方面的内容。一方面在给定的约束条件下可以设计出可能达到的最可靠的系统。另一方面,在系统可靠度一定时,又可以设计出最经济设置备份的方案。

3. 采用带有逻辑装置的待机结构储备

采用固定备份的方法的一个缺陷是,当某些固定备份本身出现故障时,将影响系统的性能,使系统结构发生变动。另外,这种方法还浪费能源。为此可以采用带有逻辑装置的待机结构储备方式。当某子系统出现故障时,由逻辑装置自动切换到所储备的子系统上去。此方法的缺点是要增加一些辅助装置。因此将会增大系统的投资和复杂性。相应地又有使系统可靠性下降的趋势。

1. 2. 3 控制系统的容错设计

控制系统的容错技术是二十世纪八十年代才发展起来的一种提高控制系统可靠性的技术,它是通过控制器的合理设计,以使控制系统在出现某些局部故障时仍能保持稳定为目的。参见文献[3—12]。目前这门技术还远未成熟,正处于发展之中,参见[140—148]。

1.“整体性”问题

对于某 MIMO 线性多变量反馈系统,如果能设计出一个控制器,使得当传感器或执行器部分失效,致使某些回路断开时,整个控制系统仍能保持稳定,则称此控制系统具有“整体性”。

目前对于“整体性”问题的研究主要还是针对传感器失效进行。对于执行器失效的研究相对薄弱一些。这主要是因为传感器失效只影响系统的闭环特征而不影响系统的开环特征,因此分析起来比较简单。“整体性”实质上就是控制系统在稳定意义上对传感器或执行机构的容错性。

2.“联立镇定”问题

若以 $P_1(s), P_2(s), \dots, P_r(s)$ 表示被控对象的 r 个工作点模型,且规定 $P_1(s)$ 为正常模式,其余 $r-1$ 个为各种可能的故障模式。如果可以设计出一个控制器使得对被控对象的所有模式,整个闭环控制系统都保持稳定,则称此系统是“联立镇定的”。显然,这是在稳定意义上关于被控对象的容错控制问题,参见[13]。

3.“可靠镇定”问题

可靠镇定问题可以如下描述:给定一个被控对象 $P(s)$,确定图 1.2.1 中的两个控制器 $C_1(s)$ 和 $C_2(s)$,使得只要 $C_1(s)$ 和 $C_2(s)$ 中至少有一个工作时,系统就可以保持稳定。显然,可靠镇定问题就是多输入多输出系统在稳定意义上对控制器失效的容错问题。当然,可靠镇定问题只是在 $P(s)$ 为非最小相位系统时才有意义。这是由于若 $P(s)$ 是

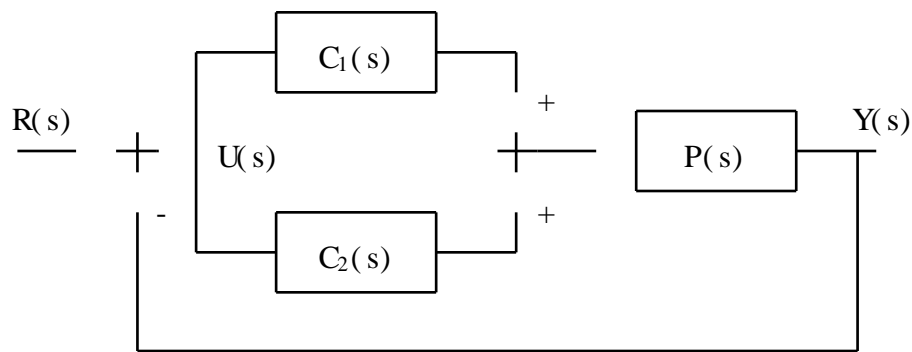


图 1.2.1 可靠镇定问题示意图

最小相位系统, 我们就可以找出一个控制器 $C(s)$, 使得它具有无穷大的增益稳定裕度。此时, 只需将 $C_1(s)$ 和 $C_2(s)$ 同时取为 $C(s)$, 即可解决可靠镇定问题, 参见[14]。

1.2.4 基于故障检测与诊断技术的容错设计

不论采取什么方法来提高系统的可靠性, 系统最终还是会发生故障的。因此故障诊断技术成为提高控制系统可靠性的最后一道防线。故障检测与诊断子系统可以在线监控整个系统的运行状态。当控制系统发生某些局部故障时, 可以迅速报警, 并分离出发生故障的部位, 以帮助维修人员迅速查找出故障源, 进行排除, 以防局部故障在系统中的传播而导致灾难性故障的发生。再进一步, 基于故障检测与诊断子系统还可以构造一种新的容错控制系统, 即根据故障诊断信息, 可得知被控对象的结构与参数变动情况。在此基础上可以重构控制律, 以确保控制系统稳定, 参见[15—18]。

实际上, 我们可以根据控制系统可能发生的各种故障, 离线确定合适的控制律, 并将所构成的各种控制律存储于实时专家系统的数据库中。当由故障检测与诊断程序在线诊断出控制系统的故障信息(类型、部位、大小)后, 可自动启动实时专家系统, 找出与此故障信息匹配的控制律, 并用此控制律在线切换掉原来的控制律, 以达到使控制系统稳定的目的。

1.2.5 小结

本节介绍了提高控制系统可靠性的四种方法, 每种方法都有其适用范围。在实际应用中通过交替使用或联合使用这些方法, 就有可能设计出经济、合理、高可靠性的控制系统。

由于控制系统中元器件的众多, 因此采用提高元器件的可靠性的方法必然会大大增加系统的投资。采用系统的高可靠性设计的方法可以对系统的关键的某些子系统或重要部件设置备份, 不失为一种比较有效的方法, 但这也是以增加硬件投资为前提。

采用控制系统的容错设计的方法可以大大降低硬件投资。只要控制器设计得合理就可保证控制系统的稳定。目前采用这种方法的主要困难是, 当系统的维数较高时, 容错控制器的设计变得非常困难。需要借助于计算机辅助设计技术, 而且容错控制器的设计是有条件的, 并不能保证所有的系统都能设计出其容错控制器。

基于控制系统故障检测与诊断技术的容错设计不失为一个有生命力的方法, 它为提

高控制系统的可靠性开辟了一条新的途径。

1.3 控制系统的故障检测与诊断技术概述

故障检测与诊断技术是由于建立“监控系统”的需要而发展起来的。由于自动化系统规模的不断扩大,复杂性的日益提高,以及系统投资的巨大,人们迫切需提高自动化系统的可靠性、可维修性和安全性。因而有必要建立一个监控系统来监督整个控制系统的运行状态,不断检测系统的变化和故障信息,进而采取必要的措施,防止系统灾难性事故的发生。而其前提则是必须具有在线检测和诊断故障的能力。

以软件冗余为主导的故障检测与诊断技术是从本世纪七十年代初首先在美国发展起来的。麻省理工学院的 Beard(1971)首先提出了用解析冗余代替硬件冗余,并通过系统的自组织使系统闭环稳定,通过比较观测器的输出得到系统故障信息的新思想,标志着这门技术的开端,参见[19]。

故障检测与诊断技术是一门综合性的技术,它涉及多门学科,如现代控制理论、信号处理、模式识别、计算机工程、人工智能、电子技术、应用数学、数理统计以及相应的应用学科。

二十多年来,故障检测与诊断技术已得到了深入、广泛的研究,已提出了众多可行的方法。综述文章[20—27, 120—121]给出了较为详细的评述。故障检测与诊断技术已经在飞机自动驾驶、人造卫星、航天飞机、核反应堆、汽轮发电机组、输油管线、宾馆空调系统、大型电网系统、汽车、船舶发动机、冶金设备、石化设备、机床、矿山机械、家用电器等各个领域得到了广泛应用。已取得了大量的应用成果,并创造了巨大的经济效益。

1.3.1 控制系统故障检测与诊断技术的主要内容

1. 故障的划分

图 1.3.1 给出了典型计算机控制系统示意图,由此可以看到,按故障部件划分,控制系统的主要故障有:

- (1) 被控过程元部件故障
- (2) 传感器故障
- (3) 执行器故障
- (4) A/D, D/A 等计算机接口故障,计算机硬件故障
- (5) 控制器故障

由于计算机硬件一般具有很高的可靠性,不易发生故障,再有控制器是由软件构成的,而软件也不易出故障,因此本书主要涉及上面的前三种故障。

按故障类型可划分为:

- (1) 脉冲型故障
- (2) 阶跃型故障
- (3) 缓慢漂移型故障

传感器与执行器常见的故障是:传感器与执行器的输出出现突变型或缓变型偏差。传感器与执行器增益逐渐衰减。元部件常见的故障是:元部件参数出现阶跃型跳变或元部件参数有缓慢漂移。

2. 故障检测的含义

当控制系统发生故障时可以及时发现并报警。通常任何故障检测子系统都不可能百分之百地正确检测出控制系统的各种故障。因此提高故障的正确检测率,降低故障的漏报率(发生了故障没报警)和误报率(未发生故障反而报警)一直是故障检测与诊断领域的前沿课题。

3. 故障诊断的含义

分离出发生故障的部位、判别故障的种类、估计出故障的大小与时间、进行评价与决策是故障诊断的主要内容。

通常故障检测比较容易,并且花费的时间较短。相反,故障诊断则比较困难,需要花费更多的时间,以便正确分离出故障的部位并更精确地估计出故障的大小。

故障分类是将故障按其严重程度进行分类,判别故障的种类是指辨别出发生了哪一类型的故障。故障的评价与决策是指根据故障的类别,严重程度,决定是否采取措施,以防故障的传播,预防灾难性事故的发生。

1.3.2 控制系统的故障检测与诊断技术的主要方法

控制系统的故障检测与诊断技术的各种方法可分为两大类,即基于控制系统动态模型的方法和不依赖于动态模型的方法。

1. 基于控制系统动态模型的方法

控制系统的执行器、传感器和被控过程可以由动态模型来描述。那么基于其动态模型就有可能对其故障进行检测与诊断。诊断的思路是利用观测器或滤波器对控制系统的状态或参数进行重构,并构成残差序列,然后采用一些措施来增强残差序列中所包含的故障信息,抑制模型误差等非故障信息,通过对残差序列的统计分析就可以检测出故障的发生并进行故障的诊断。

基于动态模型的方法又分成线性系统的故障检测与诊断方法和非线性系统的故障检测与诊断方法两大类。由于人们对线性系统的深刻认识,因此已经提出了许多成熟的关于线性系统的故障检测与诊断方法。关于非线性系统的研究相对来说就比较薄弱。本书将主要探讨基于动态模型的方法,详见第二、三、五章内容。

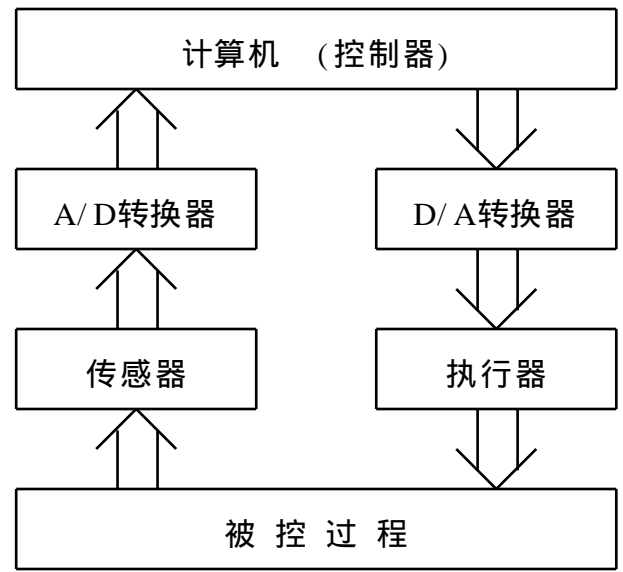


图 1.3.1 典型计算机控制系统示意图