

# 液压可靠性与 故障诊断

(第2版)

湛从昌 等编著



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press

# 液压可靠性与故障诊断

## (第2版)

湛从昌 傅连东 陈新元 编著

北 京  
冶金工业出版社  
2009

## 内 容 提 要

本书共 14 章。第 1 章至第 7 章主要介绍液压设备可靠性,包括液压设备可靠性的基本概念和基本知识、可靠性设计及可靠性分析等内容;第 8 章至第 14 章详细介绍液压设备故障诊断,包括液压元件和液压系统的故障诊断。

本书可作为高等学校机类及近机类专业的本科生或研究生的教学用书,也可供工矿企业、科研院所从事液压设备运行、管理、维修的工作人员及有关科技人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

液压可靠性与故障诊断/湛从昌,傅连东,陈新元编著.  
—2 版. —北京:冶金工业出版社,2009. 8  
ISBN 978-7-5024-4981-0

I. 液… II. ①湛… ②傅… ③陈… III. ①液压装置—可靠性理论 ②液压装置—故障诊断 IV. TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 148537 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 陈慰萍 宋 良 美术编辑 李 新 版式设计 葛新霞

责任校对 刘 倩 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4981-0

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1995 年 1 月第 1 版,2009 年 8 月第 2 版,2009 年 8 月第 2 次印刷

787 mm×1092 mm 1/16; 18.5 印张; 449 千字; 283 页; 2001-4000 册

49.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

## 第2版前言

本书自1995年出版以来,经有关冶金院校及其他院校与相关单位使用后,取得了较好的效果。近些年来,可靠性技术及液压技术有了新的发展,因此教学内容也应相应有所更新和深化,为了适应当前科技发展需要,我们对本书作了较大幅度的修改,保留了本书的特色,充实了理论,增加了我们近年来新的研究成果,使之更加适应教学、科研和生产的需求。

经修订后,原书第1章分为两章,并相应补充了一些内容;删除了原书第2章“可靠性的概率分布”、第3章“分布的适应性检验”和第4章“可靠性中的贝叶斯方法”;本书第3章至第8章和第10章保留原书的基本内容和结构,但章节号有所变化;增加了第9章“液压系统在线状态监测在故障诊断中的应用”、第11章“液压基本回路故障诊断”、第13章“液压系统污染监测与控制”、第14章“基于人工智能液压系统故障诊断方法”;在第12章“典型液压系统故障诊断实例”中增加了炼铁、炼钢、连铸、轧钢、起重机和装载机等液压系统故障诊断实例。修订后本书更好地反映先进性和实用性。

本书由武汉科技大学部分教师编写,其中湛从昌教授编写了第1、2、3、4、5、6、7、8、10、11、12、14章,傅连东教授编写了第13章,陈新元副教授编写了第9章。全书的统稿工作由湛从昌教授完成。编写过程中,陈奎生教授和曾良才教授提供了许多资料来充实本书内容,在读硕士研究生李成、范伯利等协助整理大量资料并承担部分章节的绘图工作,再版过程中还引用了一些参考文献,在此对这些文献作者和相关工作人员一并致谢。

本书存在不足之处,恳请读者批评指正。

湛从昌  
2009年5月

# 第1版前言

在科学技术迅速发展,新的技术革命浪潮正在兴起的今天,为人类服务的各种设备和系统日趋繁多复杂,对这些设备和系统的可靠性要求也越来越高。为了适应教学、科研、生产这一新形势的要求,作者编写了《液压可靠性与故障诊断》一书。

可靠性工程是近期发展起来的一门新兴学科。液压设备可靠性,是衡量液压设备质量的一个重要指标。它以提高产品质量为核心,以概率论、数理统计理论为基础,是综合运用工程力学、系统工程学、人类因素工程学、运筹学等多方面知识来研究液压设备的选配和最佳设计问题。

液压故障诊断是由现代机器设备及其元件的高度可靠性要求和需要迅速排除故障而提出的。在许多要害工业部门,已逐渐发展机器状态监视和控制技术,利用机器在运行过程中的二次效应来诊断机器的状态。所谓二次效应,是指机器在运行中所出现的现象,如温升、噪声、振动、压力振摆、泄漏量、流量、润滑油状态、运动速度以及各种性能指标。因此,深入研究这些现象,有助于逐步建立完善的诊断理论,发展完善的测试技术及实现预知维修,提高现代化维修技术水平,把定期维修改变为预知维修。这样,不仅可节约大量的维修费用,减少许多不必要的维修时间,而且还可大大增加机器设备的正常运行时间,大幅度地提高生产率,产生巨大的经济效益。

液压可靠性与故障诊断之间有着极其密切的关系。提高液压设备的可靠性,可降低其故障率,迅速而准确地诊断出故障的性质和部位,及时进行处理,既能提高有效度,又能提高可靠度。在这种思想指导下,作者总结多年给本科生和研究生讲课的实践及研究成果,并参考有关资料,撰写出本书。

本书在编写和定稿工作中曾得到过玉卿教授和武汉钢铁学院液压教研室有关老师的大力支持和帮助,在此一并致以衷心感谢。

限于作者水平,书中定有不妥之处,恳请读者批评指正。

编著者  
1994年6月

# 目 录

|                         |           |
|-------------------------|-----------|
| <b>1 引言</b>             | <b>1</b>  |
| 1.1 可靠性的地位和作用           | 1         |
| 1.2 可靠性的发展简史            | 1         |
| 1.3 液压可靠性研究概述           | 2         |
| 1.3.1 液压可靠性研究的现状        | 3         |
| 1.3.2 液压系统可靠性研究的展望      | 3         |
| 1.4 液压故障诊断技术的现状及其发展     | 4         |
| 1.4.1 液压故障诊断技术的应用现状     | 4         |
| 1.4.2 液压故障诊断技术的发展趋向     | 5         |
| 1.5 本书的主要内容             | 5         |
| <b>2 可靠性与故障诊断概论</b>     | <b>7</b>  |
| 2.1 可靠性工作的基本内容与特点       | 7         |
| 2.2 可靠性与可靠度的定义          | 8         |
| 2.2.1 可靠性               | 8         |
| 2.2.2 可靠度               | 8         |
| 2.3 失效率与失效曲线            | 10        |
| 2.3.1 失效率               | 10        |
| 2.3.2 失效密度函数与失效率和可靠度的关系 | 11        |
| 2.3.3 失效曲线与失效类型         | 11        |
| 2.4 可靠性寿命尺度             | 13        |
| 2.4.1 平均寿命              | 13        |
| 2.4.2 可靠寿命              | 15        |
| 2.4.3 中位寿命              | 15        |
| 2.4.4 寿命方差和寿命标准离差       | 16        |
| 2.5 维修度与有效度             | 16        |
| 2.5.1 维修度               | 16        |
| 2.5.2 有效度               | 17        |
| <b>3 可靠性设计</b>          | <b>20</b> |
| 3.1 可靠性设计的目的            | 20        |
| 3.2 可靠性设计应考虑的问题         | 21        |

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 3.3 系统可靠性预测              | 22 |
| 3.3.1 逻辑图                | 22 |
| 3.3.2 串联系统的可靠度计算         | 23 |
| 3.3.3 并联系统的可靠度计算         | 24 |
| 3.3.4 后备系统的可靠度计算         | 25 |
| 3.3.5 表决系统的可靠度计算         | 26 |
| 3.3.6 串联、并联系统的可靠度计算      | 27 |
| 3.3.7 上下限法               | 27 |
| 3.4 可靠性分配                | 31 |
| 3.4.1 串联系统的可靠性分配         | 31 |
| 3.4.2 并联系统的可靠度分配         | 33 |
| 3.4.3 按相对失效率和重要度来分配可靠度   | 33 |
| 3.4.4 按子系统(回路)的复杂度来分配可靠度 | 34 |
| 3.5 减额使用设计               | 34 |
| 3.6 人-机设计                | 35 |
| 3.7 液压产品可靠性设计流程          | 35 |
| 4 可靠性最优化                 | 37 |
| 4.1 概述                   | 37 |
| 4.1.1 系统模型               | 37 |
| 4.1.2 实例                 | 39 |
| 4.2 基本动态规划法              | 42 |
| 4.2.1 例4-1的解             | 42 |
| 4.2.2 例4-2的解             | 47 |
| 4.3 用拉格朗日乘子的动态规划法        | 53 |
| 4.3.1 问题的阐述              | 53 |
| 4.3.2 例4-3的解             | 55 |
| 4.4 用控制序列概念的动态规划法        | 60 |
| 4.4.1 问题的阐述              | 60 |
| 4.4.2 例4-5的解             | 60 |
| 5 可靠性试验                  | 65 |
| 5.1 概述                   | 65 |
| 5.2 寿命试验方法               | 66 |
| 5.2.1 整机寿命试验             | 66 |
| 5.2.2 寿命试验结果的处理方法        | 69 |
| 5.2.3 失效判据准则             | 70 |
| 5.3 加速寿命试验               | 71 |
| 5.3.1 试验时间与环境关系          | 71 |

|       |                        |    |
|-------|------------------------|----|
| 5.3.2 | 子样大小与环境的关系             | 73 |
| 5.3.3 | 子样大小、试验时间、置信度和可靠性之间的关系 | 74 |
| 5.3.4 | 中断试验法                  | 75 |
| 5.3.5 | 高压软管试验                 | 75 |
| 6     | 液压系统可靠性模型              | 77 |
| 6.1   | 没有维护系统的可靠性模型           | 77 |
| 6.1.1 | 串联系统                   | 77 |
| 6.1.2 | 储备冗余系统                 | 79 |
| 6.1.3 | 并联冗余系统                 | 79 |
| 6.1.4 | 系统失效时间的矩               | 80 |
| 6.2   | 有维护系统的可靠性模型            | 81 |
| 6.2.1 | 单个部件的修理                | 81 |
| 6.2.2 | 串联系统                   | 83 |
| 6.2.3 | 并联冗余系统(所有元件在线上同时工作)    | 83 |
| 6.3   | 液压系统的可靠性分析             | 85 |
| 6.3.1 | 问题的提出                  | 85 |
| 6.3.2 | 高炉炉顶液压系统的可靠性分析         | 85 |
| 6.3.3 | 轧机液压系统可靠性分析            | 87 |
| 6.3.4 | 某高炉料钟升降液压系统可靠度分析       | 88 |
| 7     | 液压设备可靠性管理              | 90 |
| 7.1   | 可靠性管理的必要性与经济性          | 90 |
| 7.1.1 | 可靠性管理的必要性              | 90 |
| 7.1.2 | 可靠性管理的经济性              | 90 |
| 7.2   | 系统可靠性管理                | 91 |
| 7.2.1 | 项目                     | 91 |
| 7.2.2 | 可靠性指标                  | 91 |
| 7.2.3 | 编制可靠性模型                | 92 |
| 7.2.4 | 可靠性保障体系                | 92 |
| 7.3   | 产品出厂后的可靠性措施及反馈信息       | 93 |
| 8     | 液压系统故障诊断基础及可靠性维修       | 94 |
| 8.1   | 液压故障诊断的重要性             | 94 |
| 8.2   | 液压故障分析与识别基础            | 95 |
| 8.2.1 | 液压故障模式                 | 95 |
| 8.2.2 | 液压故障原因                 | 95 |
| 8.2.3 | 液压故障机理                 | 95 |
| 8.2.4 | 液压故障模型                 | 96 |



|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 8.2.5 液压故障分析的基本方法 .....         | 96  |
| 8.2.6 液压故障识别 .....              | 97  |
| 8.3 液压系统共性液压故障诊断基础 .....        | 97  |
| 8.3.1 液压冲击故障诊断 .....            | 97  |
| 8.3.2 气穴与气蚀故障诊断 .....           | 98  |
| 8.3.3 液压卡紧故障诊断 .....            | 100 |
| 8.3.4 液压系统温升故障诊断 .....          | 101 |
| 8.3.5 液压系统爬行与进气故障诊断 .....       | 102 |
| 8.3.6 振动和噪声故障诊断 .....           | 103 |
| 8.3.7 液压系统泄漏故障的诊断 .....         | 104 |
| 8.3.8 液压系统进水与锈蚀故障诊断 .....       | 105 |
| 8.4 液压故障微型计算机诊断技术 .....         | 105 |
| 8.4.1 诊断系统的基本构成 .....           | 106 |
| 8.4.2 液压泵故障微型计算机诊断系统 .....      | 106 |
| 8.5 液压系统可靠性维修 .....             | 107 |
| 8.5.1 “以可靠性为中心”的维修 .....        | 107 |
| 8.5.2 “以可靠性为中心”的维修分析步骤 .....    | 108 |
| 9 液压系统在线状态监测在故障诊断中的应用 .....     | 110 |
| 9.1 概述 .....                    | 110 |
| 9.1.1 液压系统在线状态监测的含义与发展 .....    | 110 |
| 9.1.2 液压系统在线状态监测目的与内容 .....     | 111 |
| 9.1.3 液压系统在线状态监测基本要求 .....      | 112 |
| 9.1.4 液压系统在线状态监测系统结构 .....      | 112 |
| 9.2 液压系统在线状态监测的软硬件组成 .....      | 116 |
| 9.2.1 传感器 .....                 | 116 |
| 9.2.2 PLC 系统 .....              | 117 |
| 9.2.3 组态软件 .....                | 118 |
| 9.3 液压系统在线状态监测软件画面编制 .....      | 119 |
| 9.3.1 建立项目 .....                | 120 |
| 9.3.2 组态项目 .....                | 121 |
| 9.3.3 设置属性 .....                | 129 |
| 9.3.4 运行工程 .....                | 129 |
| 9.3.5 离线模拟 .....                | 130 |
| 9.4 步进式加热炉液压设备在线监测系统与故障诊断 ..... | 130 |
| 9.4.1 步进式加热炉工况 .....            | 130 |
| 9.4.2 液压系统工作原理 .....            | 131 |
| 9.4.3 系统硬件 .....                | 136 |
| 9.4.4 在线监测画面 .....              | 138 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| <b>10 液压元件故障诊断</b> .....    | 143 |
| 10.1 液压缸故障诊断.....           | 143 |
| 10.2 液压泵和液压马达故障诊断.....      | 145 |
| 10.2.1 液压泵故障诊断.....         | 145 |
| 10.2.2 液压马达故障诊断.....        | 151 |
| 10.3 液压控制阀故障诊断.....         | 152 |
| 10.3.1 换向阀故障诊断.....         | 152 |
| 10.3.2 溢流阀故障诊断.....         | 153 |
| 10.3.3 减压阀故障诊断.....         | 156 |
| 10.3.4 顺序阀故障诊断.....         | 156 |
| 10.3.5 压力继电器故障诊断.....       | 157 |
| 10.3.6 流量阀液压故障诊断.....       | 157 |
| 10.3.7 电液比例阀故障诊断.....       | 159 |
| 10.3.8 电液伺服阀故障诊断.....       | 159 |
| 10.4 液压辅件液压故障诊断.....        | 160 |
| 10.4.1 压力表故障诊断.....         | 160 |
| 10.4.2 压力表开关故障诊断.....       | 161 |
| 10.4.3 过滤器故障诊断.....         | 161 |
| 10.4.4 蓄能器故障诊断.....         | 162 |
| 10.4.5 油冷却器故障诊断.....        | 162 |
| 10.4.6 非金属密封件故障诊断.....      | 162 |
| <b>11 液压基本回路故障诊断</b> .....  | 164 |
| 11.1 液压能源装置故障诊断.....        | 164 |
| 11.1.1 输不出压力油.....          | 164 |
| 11.1.2 初始启动液压泵不吸油.....      | 165 |
| 11.1.3 液压回路设计不周,导致温度过高..... | 165 |
| 11.1.4 双泵合流产生噪声.....        | 166 |
| 11.1.5 油箱振动.....            | 167 |
| 11.2 压力控制回路故障诊断.....        | 168 |
| 11.2.1 系统调压与溢流不正常.....      | 168 |
| 11.2.2 减压阀阀后压力不稳定.....      | 172 |
| 11.2.3 顺序动作回路工作不正常.....     | 173 |
| 11.3 速度控制回路故障诊断.....        | 175 |
| 11.3.1 节流阀前后压差小致使速度不稳定..... | 175 |
| 11.3.2 调速阀前后压差过小.....       | 176 |
| 11.4 方向控制回路故障诊断.....        | 177 |
| 11.4.1 液压缸退回未达到要求.....      | 177 |

|        |                                      |     |
|--------|--------------------------------------|-----|
| 11.4.2 | 控制油路无压力 .....                        | 178 |
| 11.4.3 | 液压缸紧锁时出现微小移动 .....                   | 179 |
| 11.4.4 | 换向阀换向滞后引起的故障 .....                   | 179 |
| 11.5   | 平衡回路故障诊断 .....                       | 180 |
| 11.6   | 液压升降回路故障诊断 .....                     | 182 |
| 11.6.1 | 升降台液压回路 .....                        | 182 |
| 11.6.2 | 辊子同步升降液压控制回路 .....                   | 184 |
| 12     | 典型液压系统故障诊断实例 .....                   | 187 |
| 12.1   | 液压机液压故障诊断 .....                      | 187 |
| 12.1.1 | 液压机简介 .....                          | 187 |
| 12.1.2 | YA32-200 型四柱万能液压机液压功能回路及其液压原理 .....  | 187 |
| 12.1.3 | 液压机液压故障诊断 .....                      | 189 |
| 12.2   | 组合机床液压故障诊断 .....                     | 190 |
| 12.2.1 | 组合机床简介 .....                         | 190 |
| 12.2.2 | YT4543 型他驱式动力滑台液压故障诊断 .....          | 190 |
| 12.3   | 液压剪板机液压故障诊断 .....                    | 192 |
| 12.3.1 | 液压剪板机液压功能动作及其液压原理 .....              | 192 |
| 12.3.2 | 液压剪板机液压故障诊断 .....                    | 193 |
| 12.4   | 塑料注射成型机液压故障诊断 .....                  | 194 |
| 12.4.1 | 塑料注射成型机简介 .....                      | 194 |
| 12.4.2 | XS-ZY-500 型塑料注射成型机液压功能回路及其液压原理 ..... | 194 |
| 12.4.3 | 塑料注射成型机液压故障诊断 .....                  | 195 |
| 12.5   | 550 m <sup>3</sup> 高炉炉顶液压故障诊断 .....  | 198 |
| 12.5.1 | 液压系统简介 .....                         | 198 |
| 12.5.2 | 故障诊断和维护处理 .....                      | 198 |
| 12.6   | RH 装置真空主阀液压故障诊断 .....                | 200 |
| 12.6.1 | 概述 .....                             | 200 |
| 12.6.2 | 液压系统故障诊断 .....                       | 200 |
| 12.7   | 连铸机液压故障诊断 .....                      | 201 |
| 12.7.1 | 连铸机简介 .....                          | 201 |
| 12.7.2 | 拉矫机上辊液压系统故障诊断 .....                  | 201 |
| 12.8   | 轧机液压 AGC 系统液压故障诊断 .....              | 202 |
| 12.8.1 | 概述 .....                             | 202 |
| 12.8.2 | 轧机液压 AGC 液压控制系统故障树分析 .....           | 204 |
| 12.8.3 | 轧机液压 AGC 控制系统故障归类 .....              | 205 |
| 12.8.4 | 轧机液压 AGC 典型故障案例 .....                | 206 |
| 12.9   | 带钢跑偏控制系统液压故障诊断 .....                 | 206 |
| 12.9.1 | 概述 .....                             | 206 |

|         |                                 |     |
|---------|---------------------------------|-----|
| 12.9.2  | 光电液伺服跑偏控制系统的组成及工作原理             | 207 |
| 12.9.3  | 跑偏控制系统液压故障诊断及维护                 | 208 |
| 12.10   | 热轧厂液压升降台液压故障诊断                  | 210 |
| 12.10.1 | 升降台工作原理                         | 211 |
| 12.10.2 | 故障现象                            | 212 |
| 12.10.3 | 故障分析与排除                         | 212 |
| 12.11   | 液压叉车液压故障诊断                      | 212 |
| 12.11.1 | 工作装置(货叉升降、门架倾斜)的故障诊断            | 213 |
| 12.11.2 | 转向部分的故障诊断                       | 214 |
| 12.12   | Q <sub>2</sub> -8型汽车起重机液压故障诊断   | 215 |
| 12.12.1 | 简介                              | 215 |
| 12.12.2 | Q <sub>2</sub> -8型汽车起重机的故障分析与排除 | 217 |
| 12.13   | ZL50型装载机液压故障诊断                  | 218 |
| 13      | 液压系统污染监测与控制                     | 221 |
| 13.1    | 液压系统油液污染诊断                      | 221 |
| 13.1.1  | 液压系统的污染物及其危害                    | 221 |
| 13.1.2  | 液压系统的污染物分析                      | 224 |
| 13.1.3  | 液压系统污染监测                        | 229 |
| 13.2    | 液压元件的污染控制                       | 232 |
| 13.2.1  | 元件的失效形式                         | 232 |
| 13.2.2  | 元件的净化                           | 232 |
| 13.2.3  | 元件的清洗和清洁度控制                     | 233 |
| 13.2.4  | 元件清洁度的评定                        | 234 |
| 13.3    | 液压系统的污染控制                       | 235 |
| 13.3.1  | 污染源与控制措施                        | 235 |
| 13.3.2  | 油箱和管道的清洗                        | 236 |
| 13.3.3  | 液压系统的清洗                         | 236 |
| 13.3.4  | 防止污染侵入的措施                       | 237 |
| 13.4    | 液压系统污染控制管理                      | 240 |
| 13.4.1  | 油液污染管理与综合净化                     | 240 |
| 13.4.2  | 液压系统污染控制管理规范                    | 243 |
| 13.4.3  | 油液污染度的表示方法                      | 243 |
| 13.4.4  | 改进和完善液压油的过滤系统                   | 246 |
| 14      | 基于人工智能液压系统故障诊断方法                | 249 |
| 14.1    | 概述                              | 249 |
| 14.2    | 基于专家系统液压系统故障诊断方法                | 250 |
| 14.2.1  | 简介                              | 250 |

---

|        |                               |     |
|--------|-------------------------------|-----|
| 14.2.2 | 专家系统的组成和功能 .....              | 252 |
| 14.2.3 | 推理机制 .....                    | 254 |
| 14.2.4 | 知识表示 .....                    | 255 |
| 14.2.5 | 知识的获取 .....                   | 256 |
| 14.2.6 | 新型专家系统 .....                  | 258 |
| 14.2.7 | 液压系统故障诊断专家系统实例 .....          | 261 |
| 14.3   | 基于人工神经网络液压系统故障诊断方法 .....      | 265 |
| 14.3.1 | 简介 .....                      | 265 |
| 14.3.2 | 基于人工神经网络的结构 .....             | 265 |
| 14.3.3 | 神经网络液压系统的离线故障诊断 .....         | 265 |
| 14.3.4 | 神经元网络的液压控制系统在线故障诊断 .....      | 266 |
| 14.3.5 | 利用 B-P 神经网络对柱塞泵进行故障诊断实例 ..... | 267 |
| 14.4   | 液压系统故障的模糊诊断方法 .....           | 268 |
| 14.4.1 | 液压系统故障诊断中的模糊性 .....           | 268 |
| 14.4.2 | 液压系统模糊诊断的基本原则 .....           | 269 |
| 14.4.3 | 模糊诊断方法 .....                  | 270 |
| 14.4.4 | 液压系统故障模糊诊断实例 .....            | 271 |
| 14.5   | 灰色系统理论在液压系统故障诊断中的应用 .....     | 274 |
| 14.5.1 | 灰色系统理论基本概念 .....              | 274 |
| 14.5.2 | 灰色关联度分析 .....                 | 275 |
| 14.5.3 | 灰色关联度分析在液压系统故障诊断中的应用 .....    | 278 |
| 附录     | 液压传动装置的平均失效率 .....            | 281 |
| 参考文献   | .....                         | 282 |

# 1 引 言

## 1.1 可靠性的地位和作用

在综合性很强的现代化工业企业中,由于设备布局紧凑,生产控制非常复杂,因此对设备可靠性的要求很严格。若设备使用不当,任何细小的差错和故障都可能引起燃烧、爆炸甚至是人员伤亡,造成极大损失。

例如,1957年,美国发射先锋号卫星只因一个2美元的元件失效,造成了价值220万美元的卫星坠毁,3名宇航员死亡。1963年,美国海军航空兵每飞行10000h就有1.46次事故,仅在这一年里就发生了514次重大事故,毁机275架,死亡驾驶员222人,损失2.8亿美元。分析其事故原因,有43%归因于器材和液压设备不可靠。另外美苏合作发射的载人卫星,因返回时操作失灵,造成宇航员丧命。由此可见,任何产品,只要可靠性不高,都会造成极为严重的后果。

据有关资料报道,20世纪60年代中期,美国因机械产品等质量问题每年损失400亿美元。1989年7月,美国联合航空公司PC-10大型客机从丹佛飞往芝加哥途中,由于液压系统失灵,造成110名乘客和机组人员遇难。2004年1月3日上午10时,埃及客机从沙姆沙伊赫起飞后不久,就因机械液压故障在红海坠毁,机上148人全部遇难。2004年11月15日,中国东方航空公司一架客机因液压系统故障迫降广州。2004年5月,某大钢厂四号步进式加热炉液压系统出现故障,停产十余天,造成很大的经济损失。2008年11月19日,上海航空公司一架波音737客机在飞往柬埔寨金边途中,液压控制系统出现液压油泄漏故障,紧急迫降海口美兰机场。

由于具有独特的优点,液压设备广泛应用于各行各业,特别是某些重要设备的关键部位,如轧钢机的辊缝调节、电弧炼钢炉的电极升降、连铸机结晶器的振动、取向硅钢大型电感加热炉等均采用液压控制系统,如果液压系统中某个元件乃至某个密封圈不可靠,都会造成机器不能运行,给生产和安全带来很大损失。例如,轧钢机的压下装置由电动机械传动改为液压压下,提高了辊缝调整速度(如热轧带钢的轧速从20m/min提高到1600m/min),能适应高速轧制的要求。由于轧制速度很快,如果液压控制系统或其他部位失灵,在短时间内就会造成大量钢材报废。

由此可见,可靠性在产品的生产和使用中具有举足轻重的地位和作用。

## 1.2 可靠性的发展简史

研究可靠性始于20世纪40年代。第二次世界大战时德国对火箭的诱导装置的可靠性研究。该装置因电子设备很复杂,工作又不可靠,造成有的火箭在发射台上爆炸,有的坠入英吉利海峡。参加研制的数学家R. Lusser首先提出对串联系统利用概率乘法法则,把一个

系统的可靠度视为该系统部件的可靠度乘积,即 $R_s = R_1 R_2 \cdots R_n$ 或 $R_s = \prod_{i=1}^{i=n} R_i$ ,最后算得火

箭诱导装置的可靠度  $R_0 = 0.75$ 。可靠度较低,容易出故障。这个计算开创了可靠性建立在数值基础上的先例。

1942年,美国以麻省理工学院一研究室为中心,对当时电子设备产生故障的主要元件真空管的可靠度问题作了深入的调查研究。

1950年,美国成立了海、陆、空三军“国防部电子设备的可靠性专门工作组”,1952年发表了关于可靠性17项建议的报告,并将该工作组改名为“国防部电子设备可靠性顾问团”(AGREE)。

1958年,日本科学技术联盟设立了可靠性研究委员会。

1962年,法国由国立通讯研究所成立了“可靠性中心”;英国出版了《可靠性与微电子学》杂志;苏联和东欧也先后开展了可靠性研究。

1965年,国际电工委员会(IEC)设立了可靠性技术委员会TC56,在东京召开了第一次电子产品可靠性学术讨论会,统一了各国可靠性名词术语,并制定了标准。1968年,在布达佩斯召开了第二次电子产品可靠性学术讨论会。

我国可靠性研究是从20世纪50年代末开始的,当时第四机械工业部在广州成立了可靠性研究所。到了60年代,第七机械工业部也成立了相关的研究所。1975年,中国科学院应用数学研究所举办了“可靠性数学讨论班”。1979年,中国电子学会成立了可靠性与质量管理学会。1980年,在全国可靠性学术交流会之后,不少高等学校开设了可靠性理论及应用方面的课程,并开展这方面的研究,主要是针对电子产品、电子设备方面的可靠性研究。国防工业,航空航天工程十分重视可靠性工程研究,在人员培训、可靠性技术开发等方面均取得了可喜成果。从2005年开始,中国航天科工集团公司系统地开展了导弹武器系统全寿命期可靠性保障工程的论证和规划工作,比较全面和准确地勾画出了航天科工集团公司可靠性工作的整体结构和发展思路,为今后有计划、有组织、系统地开展可靠性工作奠定了基础。

可靠性理论及技术在机械工程方面的应用有一定进展,目前对齿轮、轴承等零件及整机已开始应用可靠性设计。可靠性理论及技术在液压设备方面的应用刚刚开始,本书对液压可靠性作探讨性介绍。

### 1.3 液压可靠性研究概述

可靠性这一新兴的学科,从问题的提出到现在已得到了广泛的应用。狭义的可靠性是指产品在规定的条件和时间内,完成规定功能的能力。这种能力的概率则称为可靠度,记为 $R(t)$ 。显然,可靠度是时间的函数。随着机电产品功能的完善,容量和参数的增大以及向机电一体化方向发展,产品的结构日趋复杂,使用条件日趋苛刻,于是产品发生故障和失效的潜在可能性越来越大,可靠性问题日趋突出。现代社会生活中不乏由于产品失效或发生故障而造成机毁人亡的实例,使企业乃至国家的形象受到影响;反之,也有很多因重视产品质量和可靠性,而获得巨大效益和良好声誉的典型。正因为如此,世界各工业发达国家对其产品规定了可靠性指标。指标值的高低决定着产品价格的高低和销路的好坏,因而成为市场竞争的重要内容。随着液压产品失效和发生故障概率的增加,液压可靠性理论、技术、方法的发展和应用也日益引起各国的重视。液压可靠性研究的主要任务是提高产品的可靠性,延长使用寿命,降低维修费用。

### 1.3.1 液压可靠性研究的现状

#### 1.3.1.1 液压元件的可靠性研究

对于任何一个液压系统,其元件的可靠性都是系统可靠性的基础。液压元件大多精密贵重,结构复杂,不少是单件小批量生产和设计的,因而液压元件的可靠性研究工作十分重要且有不少困难。

现阶段液压元件的可靠性研究工作主要有以下几个方面:

(1) 利用故障树分析法(FTA)、失效模式效应和致命度分析法(FMECA)对液压元件进行可靠性分析和设计。

(2) 利用新理论对液压元件进行新的分析和设计,采用新的设计理论代替旧的设计方法,设计出新型可靠的元件。

(3) 液压元件可靠性试验的研究。

#### 1.3.1.2 液压系统的可靠性研究

液压系统的可靠性研究和其他系统一样,主要以整修液压系统为目标,进行液压系统可靠性预测和分配,包括液压系统可靠性分析、液压系统可靠性设计、液压系统可靠性试验、液压系统可靠性增长、液压系统可靠性管理等几方面的工作。目前研究的主要方向有:

(1) 液压系统的可靠性预测。计算一个系统的可靠度是衡量一个系统优劣以及是否满足任务要求的一个重要参数,也是系统和系统间相互评判的一个重要手段,是系统可靠性研究的重要一部分。

(2) 液压系统的可靠性分析。通过对液压系统进行可靠性分析得出的可靠性信息、故障模式、故障间的传播关系等,可以用来深层地了解液压系统的内部结构,为液压系统的设计管理和故障诊断提供大量的方便和依据。

(3) 液压系统的可靠性设计。可靠性设计是可靠性工程中最重要的一环,“可靠性是设计出来的”这一概念已被人们认同,在设计中提高系统的可靠性是十分重要的。

(4) 液压系统的可靠性管理。

### 1.3.2 液压系统可靠性研究的展望

随着计算机技术和模糊理论在各个学科的渗入,液压系统的可靠性研究工作必将更加迅速发展,预测今后液压系统的可靠性研究工作的热点和方向有以下几个方面:

(1) 计算机辅助综合可靠性分析。把可靠性研究和系统的故障诊断融合在一起,利用计算机计算速度快的特点,建立专家系统,实施在线故障检测和失效分析,提高故障诊断的效率。

(2) 建立可靠性系统工程体系。把可靠性技术与维修性、保障性相结合(Reliability & Maintenance, R&M),把管理、工程、技术联为一体,综合考虑系统的可靠性、性能、费用等因素,建立我国可靠性系统工程。

(3) 模糊可靠性研究。模糊可靠性是经典可靠性的继承和发展。现阶段,模糊可靠性在液压可靠性中有所应用。在模糊可靠性理论研究中,着重对率模、能双、能模三个分支以及模糊故障树和模糊可靠性评价等进行研究。模糊可靠性研究涉及的内容很广,对它的研究丰富了可靠性研究的手段。然而,从总体上看,模糊可靠性理论现今仍处于起步、摸索阶



段,它不像常规可靠性理论那样成熟,有较完善的方法分析来计算零部件和系统的可靠性。尽管如此,模糊可靠性理论的研究由于突破了常规可靠性理论的局限性,必将使可靠性理论取得根本性进展。

(4) 液压系统软件的可靠性研究。我国的软件可靠性研究在理论上有了不小的进步,但是在工程实践上还远落后于发达国家。对于液压系统的软件来说,应结合液压系统自身的特点开发适用于液压系统工程实践的软件可靠性分析理论。总之,要提高可靠性能水平,就要系统地从各个方面开展可靠性的建设、教育、培训和实践。在提高技术实现手段的同时,提高工程技术人员的可靠性意识;在提高可靠性设计和试验技术的同时,提高可靠性验证和检测能力;在提高可靠性技术水平的时候,提高可靠性管理水平。只有做到这“三个同时”才能使投入真正发挥效用,才能真正提高可靠性水平。

## 1.4 液压故障诊断技术的现状及其发展

各门学科的发展是互相渗透和互相促进的。液压故障诊断技术是由现代液压机械设备高度的工作可靠性要求和需要及时排除液压故障而提出来的,是将医疗诊断中的基本逻辑思想推广到液压工程技术中而形成的。在 20 世纪 60 年代初期,由于航天、军工生产的需要,液压诊断技术发展起来,随后逐步推广到核能设备、水轮机等动力设备、金属切削机床、液压机、矿山冶金设备、建筑和农业机械、运输机械、橡胶塑料机械等。

### 1.4.1 液压故障诊断技术的应用现状

(1) 目前液压故障诊断技术在液压机械的使用与维修中得到广泛应用,并且在液压故障的诊断理论、诊断方法、诊断仪器装置等方面的研究都有不少的突破。

(2) 现在的液压故障诊断方法,虽然从传统的拆检感官直接诊断进入充分利用近代检测技术诊断的阶段,但由于受诊断理论和诊断仪器设备的限制,目前多数还是以经验诊断和分析诊断法为主。将觉检辩证诊断、逻辑诊断、功能跟踪筛检诊断与过渡特性法诊断结合起来的综合诊断方法,液压系统运行过程中或极少断开液压系统局部点而定性地判断液压故障的主要手段,其查找液压故障的诊断准确率可达 90% 以上。

(3) 静态参数法诊断目前应用也较多,主要应用于泵、阀、液压马达、液压缸、液压试验台、液压测试器及万能液压检测仪等,对组成液压系统的液压元件按顺序检测进行逻辑诊断。其中将泵、阀、液压马达、液压缸拆下,单独在固定的试验台上进行测试是比较方便的,但试验台总体价格高,故应用较少。而简单的常用液压测试装置价格便宜,一般均能购买,故应用较为广泛。其他多功能的液压故障诊断仪器,一般价格高,多由国外进口,故应用较少。且应用这些仪器诊断时,必须将液压系统局部点断开,使测试仪器接入液压系统,这样就降低了液压系统连接的可靠性,并有可能使液压油污染。由于各种不同型号尺寸的液压元件的流量和压力范围很宽,故上述几种诊断参数测试仪器难以实现通用化。

(4) 为了不拆开液压系统进行诊断,又能实现诊断仪器通用化,主要采用振动声学法、热力学法和油样分析法等。但这种诊断仪器价格较高,故除重大关键成套液压设备有所应用外,一般还不具备应用的条件。

(5) 液压故障电子计算机诊断及其在线监视的专用系统已得到了应用。如大型塑料注射成型机上采用的液压故障微型计算机诊断及其在线监视系统,直接安装在机器上,通过键