

液压系统 非介入式监测技术

蔡伟 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

014061648

TH137
313

液压系统非介入式 监测技术

蔡伟 著



TH137

313

国防工业出版社

· 北京 ·



北航

C1748150

848130710

内 容 简 介

本书针对大型复杂装备中的液压系统,详细介绍了压力、流量、油温等主要参数、液压元件以及液压系统的非介入式监测诊断技术,主要内容包括:超声波管外测压、超声波管外测流、管外测温、电磁阀非介入式监测、传感器优化配置以及无线监测等关键技术,从机理分析、理论建模、装置设计、试验验证等方面进行了全面系统的阐述。

本书可供从事装备监测诊断与液压系统技术开发的科技人员,以及此领域内从事研制、试验和使用的科技人员参考,也可作为高等院校相关专业本科生、研究生教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

液压系统非介入式监测技术 / 蔡伟著. —北京:

国防工业出版社, 2014. 7

ISBN 978-7-118-09466-4

I. ①液… II. ①蔡… III. ①液压系统—监测—技术
IV. ①TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 105567 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 5 5/8 字数 158 千字

2014 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 56.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

液压系统是大型机电装备的控制与传动核心机构,密闭高压的工作环境导致其成为装备故障高发区,液压系统的状态监测与故障的快速定位一直是装备技术保障领域的一大难题,实现液压系统的监测诊断需要准确获取其工作过程中的各类状态信息。传统的监测方法由于需要进行装备拆解而导致操作复杂,适用性差,且带来了泄漏等安全隐患。本书针对液压系统的关键参数和部分液压元件,深入分析了各类本征信号的形成机理和各种外源激励信号的影响机理,针对各类特征信号建立了传播与测量模型,在此基础上完成了各类测试设备的设计和试验验证,并针对复杂系统监测中的传感器优化配置技术和无线监测技术进行了深入研究和实际运用。

笔者长期从事大型武器装备自动检测与故障诊断技术研究,先后主持和参与了十余项军内重点科研项目、国家自然科学基金项目以及中国博士后科研基金项目,在工作过程中积累了大量的理论知识与实践经验,并形成了一系列创新思路与解决方法,对复杂系统信息获取技术和特种装备测试诊断技术的发展都有很好参考价值。

本书紧紧围绕液压系统非介入式监测诊断的一系列关键技术展开研究,从振动、磁场、温度等本征信号的形成发展机理和超声波等外源激励信号的影响机理着手,详细阐述了小管径条件下的超声波管外压力测量原理和流量测量原理、圆管管壁及油液导热机理和热平衡模型、电磁线圈磁场模型和阀芯运动模型,创造性地提出了基于控制表面能量守恒的油温探测方法、基于磁场和振动联合探测的电磁阀监测诊断方法,并从工程应用的角度探讨了大型装备多点位并行监测中的传感器优化配置技术和无线监测技术。

本书内容反映了作者在该领域的一系列创新思路与解决方法,所建模型均已经过严格的数学推导和仿真验证。为了确保论述内容的完整性并易于理解,撰写过程中引用了部分前人的研究成果和一些国内外的相关著述,书中对主要参考文献已进行了标注,在此谨向原著作者以及为这一领域发展做出贡献的科研人员致以诚挚的敬意!

在本书撰写过程中,黄先祥院士、张志利教授、胡昌华教授对本书内容提出了一系列修改意见,在此谨向以上专家致以衷心的感谢!课题组的高钦和教授、张金玉副教授、戴民强博士、孙凌逸博士、杨志勇博士给了我无私的支持与帮助,肖永超、周颀、郑贤林、王君、徐文华、李慧、伍樊成、黄坤阳等同志在课题研究和本书校对中也付出了辛勤的努力,在此一并深表谢意!另外,还要感谢我的妻子李敏教授和儿子蔡彦成小朋友对本人工作的理解以及为家庭的付出,并感谢父母和岳父母对我的支持和期盼,在此谨向家人致以衷心的感谢!

由于水平有限,书中不妥之处在所难免,热切期望来自读者的批评与指正。

蔡伟

目 录

第1章 绪论	1
1.1 液压系统的监测诊断	1
1.2 非介入式监测技术的定义与特点	2
1.3 本书的主要研究内容	4
第2章 超声波管外测压与测流技术	6
2.1 超声波管外压力测量机理分析	7
2.1.1 管路内流体压力分布	7
2.1.2 管外测压原理	10
2.1.3 管路压力—超声波传播时间模型	12
2.2 超声波管外流量测量机理分析	14
2.2.1 超声波时差法流量测量原理	15
2.2.2 超声波时差法流量测量法改进	18
2.2.3 超声波传播路径和能量衰减分析	20
2.3 超声波探头及夹具设计	23
2.3.1 探头选型	23
2.3.2 超声波管外测压装置夹具优化设计	24
2.3.3 超声波管外测流探头优化	26
2.3.4 超声波测流探头夹具设计	31
2.4 电池供电的低功耗超声波发射接收电路设计	33
2.4.1 发射电路设计	35
2.4.2 接收电路设计	37

2.4.3	基于超同步 FIFO 的高速采集电路设计	39
2.5	基于经验模态分解的超声波回波信号处理	46
2.5.1	回波信号特性分析	46
2.5.2	基于经验模态分解的回波信号去噪	47
2.6	试验验证	52
2.6.1	超声波管外测压试验	52
2.6.2	超声波管外测流试验	58
	参考文献	63
第3章	基于热传递与热平衡的管外测温技术	65
3.1	圆管管壁的导热机理	65
3.1.1	圆管管壁热传导	65
3.1.2	圆管管壁与空气及油液的对流换热	67
3.1.3	圆管管壁与空气及油液的辐射换热	70
3.2	基于控制表面能量守恒的圆管管壁热传递	71
3.2.1	圆管外壁与空气层的热传递平衡	72
3.2.2	圆管内壁与油液层的热传递平衡	73
3.3	层流状态下油管内充分发展区油液对流换热	75
3.3.1	圆管内油液层流流动分析	75
3.3.2	圆管内油液速度和温度分布	76
3.3.3	油液平均温度计算模型	77
3.4	非介入式管外测温模型的试验验证	77
3.4.1	测温模型试验验证方案	77
3.4.2	传感器的安装	79
3.4.3	试验验证	80
	参考文献	83
第4章	基于磁场和振动探测的电磁阀监测诊断技术	85
4.1	电磁阀常见故障及可测性分析	86

4.1.1	电磁阀的常见故障	86
4.1.2	各类故障的振动、磁场可测性分析	86
4.2	典型电磁阀动态特性的建模与仿真	87
4.2.1	电磁阀不同工作状态下的数学模型	87
4.2.2	电磁阀动态特性仿真模型	94
4.2.3	电磁阀典型故障仿真	98
4.3	电磁阀非介入式测试装置设计与试验	105
4.3.1	电磁阀非介入式测试装置工作原理	105
4.3.2	信号检测试验与模型有效性分析	109
4.4	电磁阀振动信号分析与故障识别	114
4.4.1	检测诊断方案的提出	114
4.4.2	振动信号的小波包分解	115
4.4.3	基于神经网络的故障识别	123
	参考文献	129
第5章	基于多目标优化的传感器配置技术	131
5.1	特征信号关联性分析	132
5.2	传感器优化配置原则	133
5.3	基于信息熵的传感器优化配置技术	134
5.4	基于多目标优化的传感器配置技术	136
5.4.1	装备可测信息的数学描述	136
5.4.2	传感器优化配置中的约束条件	138
5.4.3	传感器配置中的优化目标	140
5.4.4	传感器优化配置模型的构建	141
5.4.5	工程实例分析	141
	参考文献	153
第6章	基于无线传感网络的监测诊断技术	154
6.1	无线监测系统的基本概念	154

6.2	无线监测系统的一般设计流程	156
6.3	无线监测系统中的信道建模	160
6.3.1	现场射频电磁环境及无线信道的测量	161
6.3.2	基于混合盲信号分离预测技术的电磁干扰建模 ...	163
6.3.3	无线监测系统信道分析实例	166
6.4	无线监测中的混合组网技术	168
6.4.1	基于现场总线和 Zigbee 无线网络的 混合组网技术	169
6.4.2	基于无线异构分簇网络的混合组网技术	170
6.5	无线监测网络参数的自适应优化	171
	参考文献	174

第1章 绪 论

在武器装备、航空航天、工程机械等应用领域,液压系统作为传动与控制的核心机构,因其传动比大、工作平稳等优点而得到了广泛的应用。本书将以液压系统为研究对象,探讨液压系统主要参数和部分液压元件的非介入式监测诊断技术。

1.1 液压系统的监测诊断

随着大型武器装备和工程机械的功能与集成度不断增加,液压系统的规模与复杂性日益提高,元件及系统的故障与失效原因也更加复杂,而状态监测技术可以有效地提高设备运行的可靠性与安全性,它将传统意义上的设备定期维护提升为按需维护与预测维护。特别是现代液压设备,与电子技术、计算机技术结合得更为紧密,正朝着智能化、融合化、网络化以及节能环保的方向发展,这对液压系统的状态监测和故障诊断提出了更高的要求。

液压系统状态监测指采用各种检测、监视、分析和判别方法,特别是通过各类传感器获取液压系统的现场工作参数,如压力、流量、油温、油液污染度、泄漏量,结合液压系统运行的历史纪录,综合考虑环境因素,达到了解和掌握液压系统的工作状态,对运行状态进行评估,对异常状态作出报警,以便操作人员及时分析处理,并为故障诊断提供数据与信息的目的,它是故障诊断的起点和基础,见图 1.1。

对液压系统进行状态监测的主要目的包括以下三方面:

(1) 准确获知系统的实时运行状态,保证系统正常工作,防止意外事故发生。

(2) 对系统中主要元件如油泵、换向阀、压力阀、液压缸及电液伺

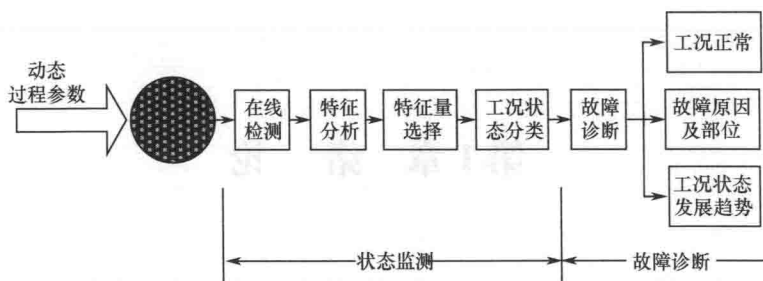


图 1.1 状态监测与故障诊断系统的主要环节

服元件等的工作特性进行监测,对潜在故障进行预报,防止液压元件突然失效而导致系统出现故障。

(3) 预测系统状态的变化趋势,对运行趋势进行评估,对将要发生的故障进行预报并提出相应的排除方法或处理建议。

1.2 非介入式监测技术的定义与特点

集成有液压系统的大型装备往往是机、电、液耦合的一体化复杂系统,液压系统的运行涉及机械、电子、自动控制等环节,其故障具有多样性、关联性、瞬态性、随机性等特点。对液压系统进行监测诊断需要准确获知液压回路中主要参数和关键液压元件的状态,以及相应的电气控制信号与机械部件的运动状态。由于作为液压系统工作介质的油液封闭在液压回路中,加之许多装备工作在高压状态,与电气控制信号和机械部件状态的检测相比,液压回路的相关参数和液压元件状态的信息获取更加困难。传统液压检测方法大多采用介入式检测方案,即把液压油路拆解后,将测试设备或传感器接入油路中进行测量,这种方案操作复杂,且拆解重装过程中存在泄漏等安全隐患。

液压系统的非介入式监测技术是近年来迅速发展起来的一种新型检测技术,其特点是监测过程无需对液压系统进行拆解,直接将传感器安装布设在液压元件、管路的表面或其附近,通过接收液压系统工作过程中的外部表象信号,或采用不影响其正常工作的外加激励方式,检测液压系统反馈的特征信号,并通过信号处理、数据分析、模式识别等技

术实现对液压回路中主要参数和关键液压元件状态的检测。

非介入式监测 (non - intrusive monitoring 或 non - invasive monitoring) 主要体现在以下 3 个方面:

(1) 安装过程的非解体 (non - disassembled), 即安装监测设备时不需要对被测对象的主要工作单元如电路、油路、气路以及用于工作的机械连接和运动连接等进行拆解, 而仅通过表面安装或附近安装等方式。其中, 表面安装可以通过粘贴、吸附或在不拆解原系统前提下的螺纹连接、专用夹具连接等方式。

(2) 工作过程的非干预 (non - intrusive 或 non - interfering), 即监测过程中不会影响被测对象的正常工作, 仅仅通过敏感被测对象工作中的外部表象信号如位移、速度、加速度、振动、冲击、应力应变、表面温度、外部磁场、声信号、红外热象等, 或通过外加激励的方式测量被测对象对激励的反馈, 这种外加激励必须不会影响装备的正常工作, 如超声波等外加声发射探测、射线穿透检测等。

(3) 信息获取的在线式, 即对被测对象工作过程的监测, 此处与非接触式相区别, 后者强调不与被测对象直接接触, 但可以采用在线检测和离线检测两种方式, 而前者必须是原位在线监测。

非介入式监测最大的优点就是克服了传统的介入式监测方法安装复杂、拆解重装过程中存在安全隐患等缺点, 无需预留测试接口, 安装方便, 测试部位灵活, 功能组态简单, 易于组网实现多点或全系统同步监测, 监测设备可重复使用。特别是对于液压系统而言, 监测过程不与被测流体接触, 不干扰原来流体的流动状态, 因此测试结果的真实性和有效性更好。

对液压系统的非介入式监测而言, 常用的测试信号既包括可在系统外部测到的振动、磁场、温度等本征信号, 也包括为测试液压系统特征参数而专门施加的外源激励信号, 如超声波流量测量中的外加超声波信号等。就本征信号而言, 非介入式监测除需要研究信号在液压系统内部不同回路、不同部位的形成发展机理和分布特性外, 还需研究其通过液压系统回路内部向表面或外部的传输特性; 而对于外源激励信号, 其作用犹如通信技术中的载波, 除选择能够有效承载液压系统特征

参数的激励信号外,更重要的是研究其自外部穿过液压系统并再次返回外部的过程中,液压系统及其不同的工作状态对外源激励信号的影响机理。

1.3 本书的主要研究内容

本书紧密结合著者近年来主持和参与的国家自然科学基金课题、中国博士后基金课题、多个军内科研项目,是各课题研究成果的一个综合集成。本书中的各种监测方案、测试电路、软件算法、计算模型等都是在课题研究中实际设计完成的,各种测试设备和系统均进行了试验验证,大部分都在多型装备液压系统中得到了应用,其中许多技术还已经获得或申请了国家发明专利。本书后续章节的主要研究内容介绍如下:

第2章研究了超声波管外测压与测流技术。分析了超声波管外测压和管外测流的基本原理,重点对小管径超声波管外测量中的探头专用夹具设计、低功耗发射接收电路设计、信号降噪、集成一体化装置开发等关键技术进行了详细分析,并进行了试验验证。

第3章研究了基于热传递与热平衡的管外测温技术。提出了一种基于油管外壁温度和环境温度测量的管内油温非介入式检测方法,针对圆形油管建立了基于控制表面能量守恒的油温测算模型,设计了一种模型试验验证装置,并在不同工作条件下完成了模型的试验验证。

第4章提出了一种基于磁场和振动探测的电磁阀监测诊断技术。采用振动检测和磁场探测方式,通过敏感电磁线圈通过电流时在其周围产生的磁场变化信号和电磁阀阀芯运动时传递到阀体表面的振动信号,利用预先建立的电磁阀各种工作状态模型进行特征匹配和模式识别,从而确定被测电磁阀的工作状态和故障模式。

第5章围绕液压系统监测诊断中的传感器优化配置技术展开研究。通过对被测对象信息的关联性分析确定了传感器优化配置的可行性和必要性,探讨了传感器优化配置的基本原则,采用多目标优化技术实现传感器的优化配置,并通过一个工程实例阐述了传感器优化配置

模型的构建过程和求解技巧。

第6章介绍了基于无线传感网络的监测诊断技术。在提出无线监测系统基本概念的基础上,分析了无线监测系统的一般设计流程。重点探讨了无线监测系统中基于射频频谱测量的的信道建模与分析技术,并提出了无线监测中的两类混合组网技术。

第2章 超声波管外测压与测流技术

压力、流量和温度是流体的三大基础参数,是液压系统调试、使用和维护过程中需要调节和测量的重要指标^[1]。液压系统依靠压力传递和流体流动工作,压力和流量直接反映液压系统的工作状态,通过测量压力和流量等参数,能够为液压系统的状态监测和故障诊断提供重要信息。

按照是否与被测介质接触,压力和流量测量方法分为介入式测量和非介入式测量两种。传统的压力测量方法(液柱式、弹性式、电气式和活塞式等)和流量测量方法(涡轮式、动压式等)多数属于介入式测量方法,往往需要在被测对象上开孔或设置专用连接件,通过引压管和导流器将被测介质引入检测仪表的敏感元件处,操作复杂,拆装过程存在泄漏等安全隐患,且传感器接入液压回路中容易对液体流动造成影响,降低测量精度。

压力和流量的非介入式测量方法依靠安装在管路外壁或外部的检测装置来感知压力与流量信号,克服了介入式测量方法中存在的问题,无需预留接口,不干扰液体的流动,是液压系统检测诊断领域的重要发展方向。以压力测量为例,目前常见的非介入式压力测量方法主要有两种:一种是基于管路弹性变形的压力测量方法,主要根据液体介质对金属管壁的压力作用,使管壁径向产生弹性形变的基本原理,通过检测管路外径微小变形量计算出管路内部压力,但是该方法受到管路变形特性的制约,压力检测的实时性不高,检测精度不高,对传感器的安装要求严格,操作使用不方便^[2];另一种是基于超声波的压力测量方法,主要有利用表面波在管壁中的传播速度随管壁应力变化而变化的时差法^[3]、通过检测超声纵波在管壁内外界面的两组反射波构成的干涉波幅值的干涉波法^[4]以及利用超声波在液压油中的传播速度因压力变

化而变化的时差测量法^[5]。

超声波管外测量技术是压力和流量非介入式测量的主要研究方向。通过超声波发射与回波检测可以在管道外测量管内流动流体的压力、流速和流量,无需破坏管道,不直接接触流体,无活动感应部件,具有安装使用方便、不破坏流体流场、瞬态响应快等优点。但是超声波检测法大多存在测量盲区,小管径测量精度较低,对探头安装精度要求较高,且许多监测装置需要通过计算机和高速采集设备来完成,集成度和小型化水平欠佳,主要适用于单点测量,难以满足对大型液压系统多参数并行监测的需要。

本章从超声波管外测量的机理分析入手,建立了超声波声速模型,设计了小型一体化超声波管外测压装置和超声波管外测流装置。通过新型探头夹具设计、发射电路和高速数据采集与存储电路的超低功耗设计、经验模态分解去噪等多种措施保证和增强了回波信号质量,提高测量精度。两类装置均具有面板显示和集总显示两种工作方式,可通过低功率无线传感网络,完成测量结果的上传集总,实现液压系统多个回路压力和流量的在线实时监测^[5]。

2.1 超声波管外压力测量机理分析

2.1.1 管路内流体压力分布

管路中流体的流动状态,分为层流和紊流两种。处于层流状态时,管内的流体分层流动,各流层之间不是互相混杂而是平行于管道轴线,流层间没有流体质点的交换,流体通过管路的压降与流量成正比。处于紊流状态时,管内流体不再分层流动,流体质点除沿管道轴线方向的运动外,还有剧烈的径向运动,流体通过一段管路的压降与流量的平方成正比^[6]。

雷诺数是判断液体流态的一个标准,定义如下:

$$Re = \frac{\bar{u}d}{\gamma} \quad (2.1)$$

式中: $\bar{u}$ 为流体的管内平均流速; d 为管路内径; γ 为运动黏度。

流动状态会随流速等条件互相转变,判别流动状态转变时的雷诺数,称为临界雷诺数 Re_c 。对于光滑金属圆管,工程应用中通常取 $Re_c = 2300$ 作为层流、紊流的判别标准,即当 $Re < Re_c$ 时,流动为层流; $Re > Re_c$ 时,流动为紊流。

为了建立层流和紊流状态下描述流场的统一压力测量模型,对流场常数作近似处理^[6]:设不可压缩流体在水平放置的长直管道内沿 x 方向,即管道轴向流动。流场中某一点流速和压力分布描述为

$$\begin{cases} u = \bar{u} + u' \\ p = \bar{p} + p' \end{cases} \quad (2.2)$$

式中: $\bar{u}$ 为流体微元平均速度, $\bar{u} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u dt$, 其中 t_0 为任意时间点, T 为时均长度;

$\bar{p}$ 为流体微元平均压力, $\bar{p} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p dt$, 其中 t_0 为任意时间点, T 为时均长度;

u' 为流体微元瞬时脉动速度,在层流状态下恒为 0;

p' 为流体微元瞬时脉动压力,在层流状态下恒为 0。

建立管路内不可压缩流体压力模型,除了纳维尔-斯托克斯 (Navier-Stokes, N-S) 方程外,还要涉及不可压缩条件下的连续性方程(柱坐标形式)^[6]

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} = 0 \quad (2.3)$$

和声速方程

$$\frac{\partial p}{\partial \rho} = c^2 \quad (2.4)$$

式中: ρ 为流体密度; c 为声速。

假设分析对象是硬管壁(刚性边界)、水平放置的长直管路内流动流体的流场;管内流体是无旋回运动、流动轴对称;忽略管路边界端、外力和热交换的影响。管路流体动态压力模型^[7]推导如下:

将 N-S 方程转化为柱坐标形式,并将式(2.4)代入(考虑圆管的轴对称性,无环量,第三式省略),同时联系式(2.2)、式(2.3),整理得