

分类号: TG659

密 级: 公 开

UDC : _____

单位代码: 10424

学 位 论 文

数控机床远程监测与故障诊断系统的
研究与应用

武 伟

申请学位级别: 硕士学位 专业名称: 机械制造及其自动化
指导教师姓名: 钟 佩 思 职 称: 教 授

山 东 科 技 大 学
二〇一一年四月

论文题目：

数控机床远程监测与故障诊断系统的 研究与应用

作者姓名：武 伟

入学时间：2008 年 9 月

专业名称：机械制造及其自动化 研究方向：CAD/CAM 技术

指导教师：钟佩思

职 称：教 授

论文提交日期：2011 年 4 月

论文答辩日期：2011 年 6 月 4 日

授予学位日期：

RESEARCH AND APPLICATION OF CNC REMOTE MONITORING AND FAULT DIAGNOSIS SYSTEM

A Dissertation submitted in fulfillment of the requirements of the degree of

MASTER OF PHILOSOPHY

from

Shandong University of Science and Technology

by

Wu Wei

Supervisor: Professor Zhong Peisi

College of Mechanical and Electronic Engineering

April 2011

声 明

本人呈交给山东科技大学的这篇硕士学位论文，除了所列参考文献和世所公认的文献外，全部是本人在导师指导下的研究成果。该论文资料尚没有呈交于其它任何学术机关作鉴定。

硕士生签名：

日 期：

AFFIRMATION

I declare that this dissertation, submitted in fulfillment of the requirements for the award of Master of Philosophy in Shandong University of Science and Technology, is wholly my own work unless referenced or acknowledge. The document has not been submitted for qualification at any other academic institute.

Signature:

Date:

摘 要

随着现代化的不断演进，数控机床的监测和维护复杂程度和难度不断加大，传统的单机、分布式监测及故障诊断系统处理方式已不能满足对数据采集的速度、精度、实时性、可靠性、完整性、开放性等的要求。为了保证设备的安全、稳定、高效的生产运行，并且为进一步开发和共享加工生产过程中产生的大而繁杂的信息资源，迫切需要数控机床具有网络化、数字化的远程操作、监控与诊断维护功能。

本论文分析了数控机床实际需求和特点，结合目前远程监测与故障诊断系统在国内外的发展现状及未来趋势，详细分析了数控机床远程监测与故障诊断系统构建中涉及的网络化测控技术、自动检测技术和智能故障诊断技术。本论文研究了数控机床网络化测控系统中的通信技术、系统组成以及功能特点，着重分析了组网原则与方式以及系统的硬件组成与软件结构。从整个远程监测与故障诊断体系结构入手，提出了合理的数控机床远程监测与故障诊断系统的组成结构，将系统划分为实时数据采集处理单元、智能故障诊断专家系统单元和远程监测与故障诊断单元三部分。其中数据采集处理单元采用了可编程自动化控制器作为基础现场实时采集系统，利用虚拟仪器完成数据的分析与处理任务；智能故障诊断单元分析了专家系统在数控故障诊断方面的应用，研究了故障检测、识别、表示、推理及决策控制等关键技术；远程监测与故障诊断单元采用 C/S 和 B/S 混合模式进行构建，实现了远程监测、诊断、维护、数据管理、系统管理、信息融合等功能。

关键词：数控机床，远程监测，故障诊断，专家系统，虚拟仪器

ABSTRACT

NC continue to evolve with modernization, making those complexity and difficulty of detection and maintenance to increase, the approach to data collection of traditional, stand-alone, distributed monitoring and fault diagnosis system cannot meet the speed, accuracy, timeliness, reliability. In order to ensure the safety, stable and efficient production, and for the further development about large and complex information resources accrued in production process, so CNC has an urgent need for network services, digital and remote operation, monitoring, maintenance and diagnostic functions.

This paper analyzes the actual needs and characteristics of CNC machine, combined with domestic and international development situation and future trends of the current remote monitoring and fault diagnosis system, detailed analysis of the network control technology, automatically detection technology and intelligent diagnosis of CNC machine remote monitoring and fault diagnosis system. This paper first studies communication technology, system components and features in the network measurement and control system of CNC machine, analyzes the principle and way of networking and system hardware and software structure. Then from system structure of the remote monitoring and fault diagnosis to start, made a reasonable composition, divided into three parts that real-time data acquisition and processing unit, intelligent fault diagnosis expert system unit, remote monitoring and fault diagnosis unit. The data acquisition and processing unit adopts a programmable automation controller as basis on-site real time acquisition system, using virtual instruments for data analysis and processing tasks; Intelligent fault diagnosis unit analysis the application of expert system for CNC, studies fault detection, identification, representation, reasoning, decision-making control and other key technologies; remote monitoring and fault diagnosis unit building C/S and B/S mixed-mode to achieve the remote monitoring, diagnosis, maintenance, data management, systems management, information fusion and other functions.

Keywords: CNC, Remote Monitoring, Fault Diagnosis, Expert System, Virtual Instrument

目 录

1 绪 论..... 14

1.1 课题研究背景..... 14

1.2 研究目的与意义..... 14

1.3 国内外研究现状与发展趋势..... 14

1.4 论文的研究内容与组织结构..... 14

2 网络化测控技术研究..... 14

2.1 引 言..... 14

2.2 网络化测控系统功能和特点..... 14

2.3 网络通信技术..... 14

2.4 网络化测控系统组成..... 14

2.5 本章小结..... 14

3 数控机床远程监测与故障诊断系统体系结构..... 14

3.1 引 言..... 14

3.2 远程监测与故障诊断系统的框架结构..... 14

3.3 远程监测与故障诊断系统网络体系结构..... 14

3.4 本章小结..... 14

4 自动检测技术研究与应用..... 14

4.1 引 言..... 14

4.2 数据采集与传感器技术..... 14

4.3 信号分析处理技术..... 14

4.4 虚拟仪器技术..... 14

4.5 本章小结..... 14

5 智能故障诊断系统研究..... 14

5.1 引 言..... 14

5.2 智能故障诊断系统构成..... 14

5.3 智能故障诊断实现方法..... 14

5.4 专家系统故障诊断技术..... 14

5.5 基于 ActiveX 的故障诊断专家系统..... 14

5.6 本章小结..... 14

6 数控机床远程监测与故障诊断系统的实现..... 14

6.1 系统总体结构..... 14

6.2 基于可编程自动化控制器的实时数据采集系统..... 14

6.3 LabVIEW 与数据分析..... 14

6.4 数据记录与网络发布..... 14

6.5 远程服务中心系统设计..... 14

6.6 本章小结..... 14

7 结论与展望..... 14

7.1 主要结论..... 14

7.2 工作展望..... 14

致 谢..... 14

参考文献..... 14

攻读硕士学位期间从事科学研究及发表论文情况..... 14

附录 实时数据采集系统硬件组成..... 14

Contents

1	Introduction.....	1
1.1	Background of Research.....	1
1.2	The Aim and Significance of dissertation.....	2
1.3	Research Status and Development Trend.....	3
1.4	Main Research Contents and Organizational Structure.....	12
2	Networked Measurement and Control Technology.....	14
2.1	Review.....	14
2.2	Network communication technology.....	16
2.3	System Structure.....	17
2.4	Functions and Features.....	19
2.5	Summary.....	21
3	Architecture of Remote Monitoring and Fault Diagnosis System.....	22
3.1	Review.....	22
3.2	Framework.....	24
3.3	Network Architecture.....	27
3.4	Summary.....	32
4	Research and application of automatic detection.....	33
4.1	Review.....	33
4.2	Data Acquisition and Sensor Technology.....	34
4.3	Signal Processing.....	37
4.4	Virtual Instruments Technology.....	39
4.5	Summary.....	45
5	Intelligent Fault Diagnosis System.....	46
5.1	Review.....	46
5.2	System Components.....	47

5.3	Implementation Methods.....	49
5.4	Fault Diagnosis Expert System Technology.....	54
5.5	Fault Diagnosis Expert System based ActiveX.....	58
5.6	Summary.....	65
6	CNC Remote Monitoring and Fault Diagnosis System realization.....	66
6.1	Systems architecture.....	66
6.2	Real-time data acquisition system based PAC.....	66
6.3	LabVIEW and Data Analysis.....	68
6.4	Data records and Web Publishing.....	69
6.5	Design Remote Service System.....	73
6.6	Summary.....	78
7	Conclusion and Prospect.....	79
7.1	Conclusion.....	79
7.2	Prospect.....	79
	Acknowledgement.....	81
	References.....	82
	Scientific Research and Published Papers.....	86
	Appendix	87

1 绪 论

制造企业网络化、信息化技术的不断应用,其自动化技术也不再仅仅满足于柔性化、集成化的要求,而是向着网络化、信息化和智能化的方向发展,同时随着现代制造企业控制现代化和服务管理现代化水平的进一步提高,制造企业信息系统的网络化集成也越来越受到重视。而数控机床状态网络化实时监测和故障诊断与之密切相关,它直接监控现场生产状态,对故障信息及时诊断,远程监测与故障诊断是制造企业进行信息集成分析的基础。数控机床作为网络化、数字化制造系统中的基础以及底层单元,已经成为现代制造中的重要一环,其监测维护与故障诊断已成为高效生产、安全生产过程中的关键。

1.1 课题研究背景

随着计算机、数据采集、传感器和网络技术的发展,尤其是网络化的广泛应用,制造技术也向着网络化和智能化方向发展,网络化制造已经成为生产制造企业数字化的标志。现在的设备生产地域不断扩大,加之产品用户对服务时间要求的越来越短,迫切需要新的设备维护手段和相应服务技术的支持。

数控机床不断采用现代科技技术,使得其复杂程度及维护难度不断加大,生产状态需要监测的参数增多,数据处理分析难度增大,同时对数据采集的速度、精度、实时性、可靠性、完整性、开放性要求也越来越高,传统的单机、分布式监测及故障诊断系统已不能满足数控机床的现代化维护要求。因此迫切需要数控机床具有服务的网络化、数字化以及远程操作、监控与诊断维护功能^[1,2,3]。

基于网络的远程状态监测以及故障诊断表现为生产设备的维护者与被维护对象在物理上进行分离,而在信息、逻辑上进行网络化集成。这一发展,对数控机床的维护有着重要意义,一方面扩大了维护人员对数控机床的控制范围,实现了对数控机床远程监控、远程故障诊断及维护,提高了对运行情况的管理效率,另一方面,达到了制造资源的网络化共享,可以快速集合有效的生产制造单元,及时响应生产加工的要求。

人们社会生活水平的不断进步,对产品的质量要求也是逐步提高,制造企业对于设备的投入也在不断加大,设备的复杂程度及维护难度不大增加,采用状态监测技术的必要性也已得到广泛重视。促进研发设计设备远程监测与故障诊断系统的因素是:

1) 提高维护能力

设备进行维护及故障排除时,技术人员需要对设备的参数、使用情况、故障知识等了解熟悉。但由于设备涉及知识面广,无法快速准确的确定故障原因和部位。对于连续生产设备来说,需要连续不间断的维护及修理,由于地域、领域等原因无法做到这一点。因此需要采用计算机及网络对设备进行智能维护,并将现场实时数据通过不间断、准确、及时的反馈给技术人员。

2) 提高设备性能,降低维护成本

网络化监测与故障诊断技术综合了单机及分布式监测诊断系统的优点,拥有开放式平台及低成本。这样,既保证了系统可靠性、可扩展性又降低了企业在设备维护上的投入。

3) 实现故障诊断资源共享

在企业的传统维护过程中,无法达到对设备的全寿命周期管理,更无法实现寿命周期内的知识资源继承与共享,对于同样的知识或是诊断技术可能导致不必要的重复,浪费了大量的时间、物力及财力。而基于网络的远程监测与故障诊断系统不仅可以全程跟踪设备的使用情况,更能将知识资源不断完善,实现开放式的知识资源共享。

1.2 研究目的与意义

现代化的高技术生产设备,如连续加工生产线及大型精密设备,为了保证设备的安全、稳定、高效、及时快速的生产运行,往往安装有远程工作状态监测及故障诊断维护系统。数控机床加工生产过程中产生的数据信息量大而繁杂,大量的信息资源需要开发和共享,现代制造系统的高度自动化及其繁琐的维护过程对数控机床的监控、检测和维护技术提出了很高的要求,传统的监控系统信息处理方式已不能满足要求。因此,构建现代化的监测诊断系统也成为研究的重点。然而,目前对数控机床运行状态的监测主要是以简单信号分析手段为基础,实时性差,信息集成和网络通信能力弱,上层企业信息化管理系统与实际生产制造系统,如数控加工中心等没有进行信息集成,无法实现自动化、复杂化、集成化的现代生产需要。因此,研究设计具有信息化、网络化、可扩展、和高开发性的数控机床状态远程监测与故障诊断功能和管理软硬件具有很好的实用价值和现实意义。

对于数控设备使用企业,数控机床的网络化功能将极大地满足车间生产线、制造系

统、制造企业对生产信息集成的需求。而对于数控机床制造企业，网络化维护和故障诊断技术可以完成对其产品的绿色、低耗的维护工作。数控机床的远程监测与故障诊断能够实现以下功能：

- （1）为设备维护人员提供数控机床远程在线工作状态监测与维护；
- （2）提高数控机床的维护与故障诊断水平，能够使分布在不同地域和领域的专家形成一个统一的网络，完成对于复杂故障的快速、准确、高效的诊断；
- （3）对数控机床的故障进行远程监测、诊断与维护，缩短维护服务的响应时间，提高了维护效率，降低因停机维护造成的损失；
- （4）实现数控机床的全生命周期管理。通过远程监测及故障诊断维护功能将设备的使用状况及发展趋势反馈给设计制造部门，不断完成设备的不足，实现设备从设计、制造、安装、运行、淘汰的全寿命周期管理；
- （5）设备供应商通过远程网络为企业使用的设备完成定期维护、数据监测、系统升级、故障咨询、协调诊断与维修服务。降低了产品维护费用，达到绿色制造、生产与维护的目标；
- （6）提高科研院校机构的研究能力。科研院校通过网络化维护系统从生产制造现场获得实时数据，运用不同的数据分析及诊断技术，为设备使用及加工部件提供完善的理论及实际依据，同时提高科研机构理论与实际相结合的能力。

通过上述功能描述，实现数控机床的远程状态监测，并进一步通过信息服务对设备进行远程监控管理和故障诊断，为生产制造系统提供数字化远程服务，对于现代网络化制造的发展要求与具体实施有着重要的意义。

1.3 国内外研究现状与发展趋势

1.3.1 国内外研究概况

设备的远程监测与故障诊断是制造业信息化、数字化发展的必然趋势，数控机床作为制造业的支撑基础，其安全稳定运行关系着整个制造业系统的有效稳定运作^[4]。在连续生产的流水线上，任何一台设备的故障都将是整个系统停止，并且造成巨大的经济损失。数控机床的远程监测与故障诊断也是实现计算机集成制造系统（CIMS）、柔性制造系统（FMS）、数字化制造系统（DMS）等先进制造系统的重要组成部分。

远程监测与故障诊断技术是目前研究的前沿课题，国内外都积极的展开对关键技术

的研究。其最早应用与远程医疗，这是一个网络化医疗会诊系统，包括了远程手术、专家诊断、信息共享和网络化检查等，机械设备的远程监测与故障诊断同远程医疗的模式大致相同。进入信息化时代以来，机械设备的复杂化、智能化、自动化使得基于网络技术的设备远程监测与故障诊断技术迅猛发展。美国在 20 世纪 60 年代开始研究故障诊断技术，已经在军事、船舶、航天、医疗上取得了很多实用性成果，英国、德国和日本也相继在高速铁路、核电站、民用化项目上取得不错的成功，我国由于设备技术落后，设备网络化监测诊断技术应用方面起步较晚，但是近年来也在冶金、石油、化工、高速动车上得到了蓬勃的发展。故障诊断技术发展经历了三个主要阶段，正处在第四发展阶段：

第一阶段是故障诊断技术的初始阶段。诊断技术主要是依靠技术人员、领域专家、纸质文档，通过现场感官、个人经验对故障进行诊断排除，其诊断水平受个人知识、地域条件和经验水平限制。

第二阶段是以传感器技术和动态测试技术为手段、以信号处理和建模处理为基础的常规诊断技术^[5]。采用特定测控技术对信号分析处理，包括统计分析、时频分析、相关分析、小波分析等分析手段。建模处理则是依靠信息论、系统论和控制论进行参数估计、模式识别、系统控制等。这一阶段，系统的知识获取技术、解释机制、存储传输、人机接口、推理判断、专家系统的知识表示和推理方式都有所发展。故障诊断技术在工程领域也得到了广泛应用，自身也得到长足发展，发展了许多诊断技术新方法，如振动诊断技术、光谱诊断技术、无损探伤、超声波及热成像技术^[6]。

第三阶段是智能故障诊断技术阶段。随着科学技术飞速发展，机械设备的自动化程度越来越高，结构功能日趋复杂，迫切的需要能够自主保证设备高效、安全、可靠运行的智能系统，应具有感知、思维、行为、自学习等能力。研究内容包括智能仪表、专家系统、神经网络、模糊诊断、信息融合、智能体、集成化及网络化技术。

故障诊断专家系统将采集获取的数据进行综合处理后（识别、匹配、计算），进行相应的推理，推理过程中调用各种辅助程序、知识库、推理机等，根据用户的关键信息快速准确地确定故障原因、位置并给出处理策略。专家系统则包括数据库、知识库、推理机、决策控制、人机接口等功能^[7]。

第四阶段也是现阶段研究的主要方面，包括集成式大型协作故障诊断中心、知识融合、多种知识库、多领域学科的协同诊断、并向多线程推理、神经网络专家系统以及人工智能化研究。

数控机床的远程控制、工作状态监测、故障诊断具有同等的重要性，其发展大致经

历了以下几个阶段：

1) 单机监测诊断模式。

单机监测诊断模式，即一台设备由一个诊断系统来控制^[8,9]。这种监测诊断系统工作效率较低，监测诊断工作需要技术人员进行复杂。系统内部结构封闭、功能固化，只能完成系统设计时指定的监测及诊断任务，无法进行扩展，因此无法适应被测设备多样化、复杂化、信息化的发展趋势。

2) 分布式监测诊断模式

随着大型机电设备及分布是柔性生产单元的出现，单机模式的监测诊断系统无法满足工作要求。为了适应新技术的需求，根据设备地域分布、功能特点，利用网络化技术实现了分布式监测诊断模式。该种监测诊断模式，将数据采集设备、分布式传感器、网络技术融合到一起，实现了分散监控、数据资源远程传输及共享。系统的网络化、分布式、开放性的功能大大提高了系统的使用效率。这种模式的不足在于需要在不同地域的生产车间建立局域网，导致网络建设重复，且无法使用现有的网络，扩展性较弱。

3) 基于 Internet 的远程监测诊断模式

20 世纪 90 年代以来，随着网络化、信息化的不断演进，将设备、监测系统、现代测控技术及网络通信技术想结合，发展了基于 Internet 的远程监测诊断的全新模式。该种模式将现场监测系统和远程诊断中心系统通过互联网联系起来，当被测的现场设备出现工作异常或是故障时，由现场监测系统将异常或故障信号采集并处理发送到远程诊断中心进行诊断，通过远程诊断中心的故障分析及识别，给出正确合理的结果和处置方法。不同地域的监测现场可以由统一个诊断中心进行协作和管理，真正达到信息的共享和集中式处理。这种监测诊断模式是开发性的，可以拓展、接入不同的网络和设备。

1.3.1.1 数控机床的发展与特点

数控机床是机电一体化的典型产品，它是机、电、液、气和光等多学科的综合性组合，具有高精度、高效率、高柔性的特点。技术范围覆盖了机械制造、自动控制、伺服驱动、传感器及信息处理等领域。数控机床的不断应用革命性的改变了传统的制造业，为现代化制造业带来了突飞猛进的发展。

在信息化技术飞速发展的推动下，制造业迎来了企业信息化、数字化的时代，其目的就是提供企业的制造能力及竞争力。数控机床作为主要制造装备的基础组成单元也正在向数字化、信息化的方向迈进。当前数控机床的发展趋势主要有以下几点：

(1) 高速、高精密化。现代产品需求对数控机床提出了高精度和表面质量的要求,因此数控机床大力发展高速切削、干切削等高速、高精度化技术。

(2) 高可靠性。数控机床的高可靠性是保证生产制造安全、高效、及时、低维护成本的关键技术。因此数控机床开发使用了不同的可靠性保障系统,如数控机床动力部分、刀具磨损的可靠性监测。

(3) 功能多样化。功能多样化的目的是将工件在周转、重装夹的非加工时间降低,从而进一步提高数控机床的生产效率。数控机床通过功能的多样化,扩大了使用范围、提高效率,实现了一体化加工。

(4) 网络化、智能化、柔性化和集成化。数控机床已经不再是简单的单机独立生产单元,而是协同生产的一部分,这就需要其具有网络化、信息集成化功能,实现生产制造的数字化、信息化统一管理。另一方面,为适应数控机床的高技术性及复杂性特点,要求本身具有柔性化配置、智能化自监测及诊断功能,降低在安装、使用、重配置及维护上的投入。随着 CAD、CAM、CAPP 及 MES 信息化不断应用到生产系统中,网络化、智能化、柔性化及智能化将会是数控机床的主要发展方向。本文的数控机床远程监测与故障诊断也是从这方面出发,并进行了相关技术研究^[10]。

数控机床的现阶段维护手段主要是采用人工进行现场维护,然而数控机床种类较多,涉及到电气、机械、液压、自动化等专业知识,对与设备维护人员的技术能力要求较高。另外我国在数控机床上的研发及科研落后,在高水平的维护方面相应较为薄弱。实际应用方面也只是普通的感官检验,故障诊断效率及准确性不高。在这种情况下,大力发展信息化维护手段,借助网络、计算机、专家、设备制造商的合力提供设备的维护能力,将对信息化制造带来新的活力。

1.3.1.2 远程监测与故障诊断概述

远程故障监测、预报、诊断技术,是利用远程网络系统在异地对远程的现场设备实施监视、测试,并根据测试数据进行故障的预报和诊断的技术。设备的远程监测与故障诊断技术涉及到数据采集技术、网络化应用技术、数据分析处理、故障智能诊断技术等多学科的综合技术。

设备的远程监测与故障诊断主要实现对设备进行远程实时状态监测、数据分析、故障识别与诊断。首先需要将设备的实时工作数据或是视频等通过网络传送到进行监测或故障预测及诊断的终端上,终端可以是厂级网络终端或是 Internet 网络终端,主要由数

据分析、故障识别及推理模块组成。远程数据采集是远程监测及故障诊断的基础，它为数据的分析和信息发掘提供了依据。监测的数据包括设备工作状态、各传感器信号、图像、图文报表等，对于工作异常的部位可采取数据定点分析及图像采样等。数据经过采集、预处理及网络传输存储后发送到故障诊断专家系统中进行故障原因的查找及排除，最后将控制决策信息发回到现场设备。设备远程故障诊断能够进行在线巡检、网络实时监测、离线数据分析、故障预报、故障诊断等功能。其中故障预报的主要功能是利用相关数学算法或知识推理对监测数据进行挖掘分析，从而判断设备运行趋势及故障发展方向。如果计算推理过程中有符合故障发展的趋势，系统将由控制决策模块及时发出故障预警信号并给出相关处理方法，这样能有效的避免故障的发生，这其中，故障预报算法是进行故障预报的关键核心。

远程故障检测与故障诊断是通过网络远程传输，联合故障诊断模块进行故障识别，这其中包括信号分析模块、规则库、知识库、推理机和技术专家。对于一些常见、多发、故障机理清楚、原因明确的故障，可通过系统模块自行查找解决；当遇到故障原因复杂、技术文件匮乏的情况下就需要联合技术人员、厂家等进行会商解决，其中需要远程会议、实时数据分析、可视化图像等技术数据^[1]。

机械设备的工作状态监测与故障预报、诊断、排除，需要设备运行的历史数据作为依据，紧密联系设备设计、生产、制造、维护等全寿命周期中的数据。对于零件多、结构复杂、系统多样的大型数控机床而言，发生异常与故障的位置及原因与多方面信息相关联。因此，需要研究使用设备运行状态历史数据、实时数据及维修人员的知识和经验，完成对分布在不同地域及制造领域的数控机床远程监测维护。

1.3.2 主要问题及研究重点

1.3.2.1 存在的主要问题

经过对数控机床的使用现状及监测诊断的概述，目前数控机床的远程监测与故障诊断系统的建立主要存在以下几方面问题：

(1) 数据采集系统与数据处理分析技术相脱离。一般的数据采集系统的主要功能是采集数控机床的特征参数及信号，只是对信号和参数做简单的数学运行，它缺乏对监测数据的预处理和分析能力，无法第一时间响应故障及异常信号。数据信号分析诊断系统具有对信号处理分析的能力，但是缺少硬件系统的支持，数据分析速度较低。为此，在建立数控机床远程监测与故障诊断系统时应当将两者结合在一起使用，即数据采集硬

件系统具有对异常及故障信号的预处理分析能力，以达到快速响应的目的，并结合远程故障诊断系统进行完善的故障分析与诊断。

(2) 系统通用能力差。现代测控仪器众多，功能模块固定单一，实际中多采用针对特定设备的专用监测系统，这使得系统功能相对固定，升级维护困难，因此缺少集测试、数据采集、信号分析的通用监测平台。对于不同的数控机床需要如果采用不同的数据采集系统，将会使系统的通用性及扩展性降低，应建立通用化的监测系统平台。

(3) 网络融合。在设备间的信息通信领域，存在着多种总线技术，如何将不同的总新设备连接到测控网络并发布到 Internet 也是需要解决的关键技术。

(4) 故障诊断方式陈旧。现有的故障诊断方式还只是停留在依靠经验判断的水平之上，采用仪器仪表、虚拟仪器、智能传感器及网络化测控的应用水平不够，在构建故障诊断系统的时候应多采用科学合理的理论依据及计算方法。

(5) 智能故障诊断方法。构建适合与数控机床的故障诊断方法，目前有基于信号检测、基于数学模型、基于知识及基于感知行为的故障诊断方法，在建立系统时应充分了解系统的结构特性及故障种类，选择合适切易于应用的故障诊断方法是系统的核心技术。

目前，设备的监测与故障诊断只是由维修人员简单的利用设备本身的机电系统进行自诊断，很少综合利用历史数据、现场信息、趋势分析等相关诊断技术。如何有机、合理、综合的利用这些信息将能增强设备故障预报及诊断的准确性和及时性，进一步优化完善设备的运行和维护机制，提供机械设备使用率和可靠性。随着计算机技术和人工智能技术在设备监测与故障诊断方面的深入研究，以及人工神经网络、专家系统及知识工程领域上的不断创新应用，促使设备监测与故障诊断向着自动化、智能化方向快速发展。目前研究及应用的重点主要在以下几个方面：

(1) 集成化监测与故障诊断技术研究。机械设备上科技技术的持续应用，其复杂性增加，监测与故障诊断的难度也随之增加，使用单一的技术手段无法满足系统的要求，因此需要集成多种监测技术、故障诊断分析方法及网络化技术对设备进行综合性维护。这样既能发挥各方法的优势又克服了单一方式的局限性，从而达到集成化监测与故障诊断的发展要求。

(2) 网络化监测与故障诊断研究。现有的系统多数是单机、单功能、针对特定设备的类型，这类系统功能固化，影响其扩充性、灵活性及网络化应用。网络化监测与故障诊断则充分有效的利用网络优势，实现了信息及知识资源共享、统一协调工作、及时有效响应等功能。

(3) 自适应型监测与故障诊断研究。智能传感器、智能结构、智能系统等高新技术的出现,推动监测与故障诊断系统向着具有高容错性、自诊断、自维护、自学习等自适应型方向发展。

(4) 智能故障诊断方法研究。主要研究适应与数控机床的故障识别与诊断技术,包括数据分析处理、知识表达、规则推理及决策控制等技术,改变了依靠手工计算及经验分析的故障诊断技术,重点在于适应于数控机床的故障知识表达和推理专家系统。

1.3.2.2 远程监测与故障诊断相关技术

远程监测与故障诊断是一种跨多地域、多系统的学科综合性远程协作系统。为了保证数据采集、分析处理、网络传输、数据存储、知识表达及推理的快速、及时、有效的进行,必须重点研究和解决以下关键技术:

(1) 系统分解技术。远程监测与故障诊断系统是多系统、多模块、多技术的融合体,系统建立和实现需要将一个大而复杂的系统划分成若干简单、易于维护和扩展的小系统。划分系统的方法主要依据层次、功能、区域、种类等进行分解^[12,13]。

(2) 数据采集技术。数据采集技术主要涉及到采集传感器的选择、测点设置、系统的设计。数据采集系统首先确定信号采集的类型,相应的选择传感器,然后依据被测设备的结构形式确定测点位置并安装传感器,最后设计数据采集系统,包括数据信号的放大、转换、滤波等等信号处理技术。

(3) 数据融合技术。数据融合 DF(Data Fusion)又称为多传感器信息融合。在对数据采集系统采集到的数据进行分析时,为了提高信息的有效性和可靠性,往往采用多个传感器进行数据组合对比的方式,组合方式有不同时间或是不同空间位置,这样采用多传感器信息融合,降低了单个传感器的数据采集误差,提高了故障识别的准确性。融合方式有串联、并联和混合三种形式。研究如何对设备(主要是计算机监测的接口)进行改造或重新设计,使之更适于远程监测、预报、诊断,并集成于远程监测、预报、诊断的系统中。

(4) 故障特征识别技术。数据采集系统从传感器获得的信号包含大量信息,既包含设备运行状态数据,有混杂有干扰信号,经过数据的分析及处理后形成详细的表达信息。故障特征识别就是从表达清楚后的信息中根据故障信息数据库的相关资料对数据进行比对,从而识别故障信息。经常使用的有专家系统法、模式识别法、神经网络法、决策树法等诊断决策方法^[14]。

(5) 数据传输技术。大量数据信号的获取及高速网络传输是实现远程实时、高效监测及故障诊断的难度之一，其中涉及到总线技术、网络传输结构、网络传输方式以及多种网络融合集成的技术难点。

(6) 控制决策技术。当故障诊断模块对故障进行了正确识别或是得到传感器的监测报警，系统需要对这些情况进行处理、决策和控制，以完成故障识别的后处理工作，并防止设备的进一步损坏。

(7) 网络数据库技术。数据的采集、故障推理及识别等涉及大量的数据信息，这些信息需要跨硬件系统及不同的软件系统，要求数据库的统一性及可移植性较高，并能够支持多种数据的存储。远程监测、预报和诊断需要综合利用现场监测的实时及历史信息，在设备制造企业的设备制造相关的信息如误差等质量信息，在异地的故障预报和故障诊断的算法和经验知识等等。因此需要通过网络（和数据库）等技术把异地不同的应用软件和系统集成在一起，使其构成一个能够实现所需功能的系统。

(8) 网络安全技术。网络安全技术是非常关键和重要的，目的是为了保证数据信息在存储和传输的完整性、保密性和可靠性，以确保监测与故障诊断系统的安全性。

1.3.3 未来的发展趋势

数控机床的远程监测与故障诊断系统的发展趋势可总结为开放性、高精度、智能化、网络化等，其发展趋势体现在以下几方面：

(1) 由于数控机床的复杂性，需要监测的数据种类及数据量较多，常规的数据采集、分析、处理、存储技术不能满足要求，采用新技术的多功能、多状态的监测系统将是发展的必然趋势。

(2) 高精度化是从原始信号当中利用先进数据采集分析处理技术获取反映设备工作状态的特征信息。设备监测与故障诊断中不断引入新技术，推动其向高精度、高速方向发展。如对振动信号的时域、频域、频谱分析，有效的从复杂的信号中识别有用的状态及故障信息，提高了设备监测与故障诊断的精度。

(3) 智能化是指将计算机知识表达、智能仪器仪表及智能故障诊断技术相结合，综合性的对数控机床监测与故障诊断进行协作会诊。智能故障诊断技术不断应用在故障诊断推理当中，其诊断系统智能化水平也得到提高。如神经网络、模糊诊断、信息融合、智能体等智能化诊断技术^[15]。

(4) 多层次、多模块分布式系统。数控机床的远程监测与故障诊断系统可以按照网

络结构、功能模块、系统结构分为多个层次及模块，每个系统模块或层次结构相对独立，既能保证系统的安全性，又能最大程度的扩展系统的灵活性和易维护性。系统进行监测及诊断任务可将其划分为多个子任务，交由不同的模块进行处理或多个模块协同处理，最后通过对监测及诊断信息的汇总、比较、验证等得出最终结论。这种结构形式的系统具有数据的分析处理效率高、故障识别诊断速度快、安全性高、扩展维护能力强等特点。

(5) 集成式监测与故障诊断系统。数控机床监测与故障诊断信号繁杂、诊断实例及故障信息丰富，因此在对所测信息进行分析、识别及求解过程中，设计技术方法多样，单一的系统无法满足要求^[16]。新的数控机床监测与故障诊断系统，将根据不同功能或层次划分成不同子系统，各子系统采用不同的诊断推理方法，对某一故障问题可采用分散或集中式处理，从而发挥系统高速推理、准确判断、可靠运行的优势。集成式系统应能够自匹配选择合适的信息分析、识别及推理机制，并将多种信息进行融合，具有完善的容错控制机理。

研究适合数控机床的故障识别、推理、决策及控制的专家系统，将集成多种诊断技术，包括对视频、声音、文档等多媒体信息的支持，通过网络化应用为用户提供良好的人机交互使用环境。例如采用虚拟仪器技术将现场数据采集系统、信号分析处理程序、网络化应用及远程发布等功能集成到一个开放式虚拟平台当中，集合测控、信息、网络的优势集中完成设备的监测与故障诊断，这不仅加快了设计研发的速度、同时降低了投入成本。

(6) 自主闭环监测诊断系统。这种方式的系统应具有一定的智能性，能够在无人参与情况下完成设备的状态监测、定期巡检、自我学习、故障趋势分析、故障报警、诊断、排除等自主性功能。

(7) 开放式监测与故障诊断系统。制造业是不断进行扩充和改进的行业，信息量的增加也在随之增加，开发式的系统将能够满足系统的扩展、信息融合、系统的再开发等开放式需求。

(8) 网络化应用。网络化监测与故障诊断充分发挥互联网的优势，综合人工巡检、机器自检、远程监测的手段，达到多方法的监测应用。同时结合网络数据资源共享、远程协助等优势，形成设备层、数据采集系统层、厂级网络、Internet 的多层次网络化覆盖，能够有效的覆盖被测设备及相关应用范围，从而简化维护方式、降低维护成本、提高设备的可靠性运转。发展具有远程及网络化应用功能的系统，将能够解决地域差异、信息孤立、知识资源单一的不足，同时与 ERP、PLM、MES 等其他的信息化管理系统相融合。

1.4 论文的研究内容与组织结构

1.4.1 论文主要研究内容

本文主要研究内容如下：

(1) 建立数控设备远程监测与故障诊断系统框架，并在此基础上分析本文所涉及到的几个主要功能模块及关键技术。

(2) 在主系统框架的基础上分析数控机床监测与故障诊断现代测控系统，建立合理有效的数据采集系统和数据处理分析模块。

(3) 论述不同的远程网络技术在数控机床远程监测与故障诊断中的应用，考虑不同的现场总线与数据采集模块、数据传输模块等其他现有模块的网络化连接整合技术。

(4) 介绍不同的智能故障诊断技术，分析和建立适用于数控机床的故障诊断系统，研究数控机床故障信号的识别、故障诊断的方法和推理机制。

(5) 从远程可视化数控监测和诊断技术出发，建立直观高效的人机交互技术，运用虚拟仪器技术、数据网络发布技术和故障诊断专家系统等，开发人机界面友好的实时监测与诊断软件系统。

1.4.2 论文的组织结构

本文以组建适合于数控机床的远程监测与故障诊断系统为研究目标，综合考虑设计到的数据采集、信号分析处理、智能故障诊断及网络化应用的关键问题，结合可编程自动化控制器、虚拟仪器、故障诊断专家系统等技术展开研究，论文主要内容如下：

第一章 绪论。首先分析了研究数控机床远程监测与故障诊断字体的相关背景知识、目的及意义，然后简单介绍远程监测与故障诊断的理论知识，组合考虑国内外发展现状，并对存在的技术难点、问题及未来发展趋势进行合理分析，明确了论文的主要研究内容。

第二章 网络化测控系统技术研究。对作为系统关键部分的网络化测控系统结构、组网原则及软硬件组成进行了研究，其中说明了网络测控技术、网络化通信技术、网络化测控系统的组成及其功能和特点。

第三章 远程监测与故障诊断系统体系结构。分析了现有远程实现技术的网络的体系结构、技术特点、应用方式及其应用实现的优缺点，提出了本系统基于 C/S、B/S 混合模式的四层网络结构，然后对系统的组成、功能模块的划分、关键技术问题等进行了阐述。

第四章 自动检测技术研究与应用。本章介绍了自动检测技术中涉及的数据采集技

术、传感器技术、信号分析处理技术及虚拟仪器技术。着重分析了网络化虚拟仪器在数据采集、分析处理上的应用技术。

第五章 智能故障诊断系统研究。本章介绍了故障诊断、识别、专家系统的相关内容，分析了故障检测方法、识别内容、评定标准等故障诊断实现方式，重点分析了故障诊断专家系统的应用，并结合 ActiveX 技术实现专家系统的故障信息识别、推理等功能。

第六章 数控机床远程监测与故障诊断系统的实现。应用可编程自动化控制器 (PAC)，配置多种的传感器，依靠 LabVIEW 虚拟仪器设计软件构建了可重配置、开放式的数据采集系统。采用网络化发布及网络应用技术，完成数据机床远程监测与故障诊断中心的设计，实现远程应用功能。

第七章 总结与展望。总结了全文所做的主要工作，展望了今后的发展方向，指出了本文的不足及缺点，提出了进一步的研究内容。

2 网络化测控技术研究

测控技术作为科学技术、现代化生产的重要组成部分和关键技术，已经在农业、工业、航空航天、国防上得到广泛应用。在计算机、微电子、智能仪器、网络应用技术的推动下快速发展，产生了 PC 仪器、总线仪器、虚拟仪器、智能仪器等计算机自动化测控系统。Internet 不断融合集成到各制造业系统中，为测控与仪器带来了新的发展空间与机遇，网络化测控技术成为核心研究内容。

2.1 引言

网络化测控系统由基础功能单元和网络两部分组成，系统是借助网络技术将地域分散的功能单元互联在一起，包括计算机、仪器仪表、传感器、测控模块等，从而形成具有处理和应用功能的分布式整体测控系统，共同完成数据传输、资源共享、远程协作。快速发展的软件应用同日渐成熟的 Internet 技术已经消除了网络传输速度、网络化仪器应用的发展障碍，为构建开发式、模块化、可扩展的网络测控系统提供了可能。

飞速发展的现代科学技术不断应用到制造、航空航天、气象、环境、国防、通信等重要领域，对测控系统处理的信息量和速度要求越来越高。同时被测对象的地域分布日益分散，数据信息繁重多变，不断增加的测控处理单元使系统规模日趋增大，配合协作密切相关，传统的单机测控系统无法胜任高速、高效、高质量的信息采集要求，因此，测控系统结合计算机、智能仪器、总线技术和网络技术的现代化、网络化、智能化测控系统是发展的必然趋势。

2.1.1 网络化测控系统的发展

网络化测控系统是在对大容量、高速度、远距离测控等技术需求背景下，随着计算机技术、网络通信技术从单机仪器、局部测控到跨地域、知识领域的远程网络化测控逐步发展而来的。网络化测控系统的发展由以下几个阶段：

(1) 通用仪器总线 (GPIB) 阶段。GPIB 通过 RS232 或 GPIB 接口实现了同计算机或其它仪器设备的互连，使得测控系统从独立的单机仪器发展为由计算机控制的多台仪器系统，但是这种测控系统功能单一、系统开放性差、网络传输能力弱。

(2) 标准化仪器总线 (VXI) 阶段。VXI 总线是由计算机操纵的模块化自动仪器系统^[17]。它依靠开放式体系标准, 采用通用接口方式, 实现了模块化、通用化、开放性、互换性和互操作性。通过将 VXI 仪器设备以及测控软件接入网络, 贡献软硬件资源, 初步实现了测控系统的网络化。

(3) 现场总线控制系统 (FCS) 阶段。FCS 系统是由 DCS 与 PLC 发展而来, 基础是数字智能现场装置, 本质是信息处理现场化。通过现场总线技术减少了现场布线, 用单个现场仪表实现多变量通信^[18], 不同制造厂生产的装置间可以完全互操作, 增加现场一级的控制功能, 系统集成大大简化, 并且维护十分简便。而且现场总线控制系统使用众多的智能传感器、变送器等智能化仪表组成网络化测控仪器系统。

(4) 基于 Internet 的网络化测控系统阶段。上述各种现场总线形式及仪器接口只能组建局部范围的网络测控系统, 系统的扩展依靠重复构建多个局部网络。对于信息化应用普及的大型企业来说, 这种方式无法满足较大范围的远程应用, 基于 Internet 的网络测控系统应运而生。此阶段是网络化测控系统的发展完善阶段。

2.1.2 测控系统网络化

测控系统从最初的单机模式、分布式模式到仪器仪表分散而管理集中的网络化测控系统, 达到了很大的发展, 测控系统网络化的意义可概括为以下几点:

(1) 测控系统构建成本降低。网络化测控系统的最大优势就是利用现有完善的 Internet 网络达到被测对象的数据信息共享, 并将使用复杂、价格昂贵、数量稀少的测控设备实现远程共享应用, 这样无需重复构建, 降低了远程测控系统的构建成本。

(2) 远距离测控和资源共享。应用网络测控技术, 不同地域和仪器仪表实现互联和资源共享, 测试数据、专家等都可以放到网络平台上。

(3) 测控设备远程诊断与维护。通过采集设备现场的工作数据和故障信息, 并通过网络进行远程发布、处理、分析等远程应用, 实现设备远程维护、故障诊断、趋势分析等远程维护工作。

目前, 随着网络通信技术、微电子技术、软件技术的不断进步与拓展, 测控系统的发展以开放式系统概念为指导, 以计算机技术为基础支撑, 通过不断成熟发展的网络软硬件设施组建远程检测系统, 扩展了测控系统的功能及应用范围, 不仅实现了信息资源、设备资源的共享, 还提高了生产效率和维护水平并降低系统组建成本。以 Internet 为代表的计算机网络测控技术快速发展, 功能、规模、应用范围日趋壮大, 网络化远程数据

采集、测量、监控、故障诊断、协同工作也将有大的发展进步。

2.2 网络化测控系统功能和特点

2.2.1 系统功能

传统的测控技术与计算机技术、网络技术和通信技术相融合，将不同地域的数据信息、仪器设备、知识资源、数据存储等应用逻辑进行集成，完成远程数据获取、处理、传输、存储、结果表达等测控任务，实现远程、高效、快速、准确可靠、低成本的测量与控制。

远程测量、远程仪器控制、分布式执行、数据发布是网络化测控系统的主要功能。

(1) 远程测量功能：通过远程数据采集系统或分布式 I/O 系统，从一个或多个目标点采集数据并通过网络技术发送到远程监测单元。

(2) 远程仪器控制：利用现有网络设备、测控资源构建分布式控制系统（DCS）或现场总线控制系统（FCS），完成高效便捷的远程仪器控制。

(3) 分布式执行：网络化测控系统通过将任务进行分解并发送给同一测控网络内的不同测控单元上，实现测控任务的分布式执行。采用分布式执行方式最大的优化了系统，充分有效的利用了测控资源；将大而复杂的任务分解执行提高了系统性能和工作效率。

(4) 数据发布：系统将分析处理后的测量数据、分析结构及控制参数发布到多个应用终端（用户或应用软件），实现远程应用。数据发布可以通过 Web 页面、FTP 服务器、E-mail、手机短信、网络会议等多种网络通信技术完成。

2.2.2 系统特点

与传统测控系统相比，网络化测控技术特点如下：

(1) 灵活、易于布置：网络化测控系统层次分明，易于组织和扩容，容错能力强，可靠性高。

(2) 广域性、共享性：完善的网络技术应用，使测控系统消除了地域限制，共同使用网内测控设备与数据资源。网络化将测控任务进行分解或集中处理，使得系统负载均衡、使用效率提高。

(3) 兼容性：通过多种网络通信技术的融合，使得多种网络共存，消除了信息孤岛。

(4) 可靠性：网络化测控系统中的应用端和服务器端都可采用冗余备份，各模块之

间又相对独立，容错控制能力强，提高了系统的可靠性。

(5) 低成本：通过已有的现场控制网络和 Internet 网络组建系统，降低了投资成本。使用中操作及维护人员不必到现场工作，也可节省人力及物力投入。

2.3 网络通信技术

网络化测量系统在工业控制领域具有很强的数据采集、信号调理分析、网络通信等能力。为了将地域分散的测控仪器及数据信息进行有效的网络互连，实现数据通信和资源共享目的，需要计算机网络技术具有标准、开放、可协同操作的网络结构。测控系统中的网络应能完成下列工作：

(1) 远程数据采集与处理。网络化测控系统实现的基础是数据采集与处理的网络化应用，实现测控仪器与远程应用终端的互操作，具有可靠、完备、准确、高效的数据采集、处理及分析能力。

(2) 数据共享。网络化测控系统的优势在于实现远程互操作和数据资源共享，这一优势也是网络技术的优势所在。

(3) 分布式测控。通过将大型测控任务的分解及集中，充分利用网络中的设备及信息资源，完成高效的分布式测控。

2.3.1 组网原则

测控系统的设计中日益加入网络技术的设计思想，测控网络也由集中式转变为分布式，测控网络的组建主要在下列实用性、先进性、开放性、兼容性、可扩展性、安全可靠性及可管理性原则方面考虑：

(1) 实用性原则。组建测控网络首先从具体测控任务需求上进行功能划分和概念设计，此时应着重考虑网络的使用性。根据被测对象的信号类型、结构特点和技术参数等要求，选择合适的测控仪器配置，保证网络结构的合理和实用。

(2) 先进性原则。测控网络应采用先进的设计思想，应用成熟的技术，配置优良的仪器设备，以保证一定时期内的技术先进性。

(3) 开放性、兼容性原则。测控网络的组建应制定统一的网络体系结构，遵循相关标准，使网络具备开放式和兼容性，便于网络设备及应用功能的接入。

(4) 可扩展性原则。网络设计在充分考虑当前情况，满足现有系统的要求，而且要

考虑今后系统的扩充，为功能和设备的升级留有足够的余地。

(5) 安全与可靠性原则。开放性的测控网络存在安全可靠性问题，容易受到来自网络内部及外部的非法侵入，测控系统网络设计应贯彻安全性原则，保证系统的可靠运转。例如采用适当的冗余、身份认证、防火墙等安全保护措施。

(6) 可管理性原则。网络系统良好的可管理性，将极大帮助维护技术人员进行测控任务安排、系统配置、数据分析、网络传输等管理工作。

在测控系统组建中经常使用到下列测控网络、总线、接口和通信协议：

(1) 串行网络。串行总线通常是指按位串行数据的通路，由于其传送线较少、接口简单、成本低、传输距离远，所以广泛用于计算机连接外设和计算机组网^[19]。这其中包括 RS-232C、RS-485、USB(Universal Serial Bus)、IEEE1394(Fire Wire)总线。

(2) 测控系统机箱底板总线。在总线底板插槽上插入各种信号输入/输出功能插件，可组成不同功能和规模的测控系统。主要有 ISA (Industrial Standard Architecture, 工业标准结构)、EISA (Extended Industrial Standard Architecture, 扩展工业标准结构)、VESA (Video Electronics Standards Association, 视频电子标准协会)、PCI/Compact PCI。

(4) 仪器总线。仪器总线随着计算机技术和测量仪器技术的发展不断发展、不断更新。测控领域特有的总线有 GPIB (General-Purpose Interface Bus, 通用接口总线)、VXI (VME bus extension for Instrumentation)、PXI (PCI Extensions for Instrumentation, 面向仪器系统的 PCI 扩展)。

(4) 现场总线。现场总线是指以工厂内的测量和控制机器间的数字通讯为主的网络，也称现场网络。大多用于过程自动化、医药领域、加工制造、交通运输、国防、航天、农业和楼宇等领域^[20]。目前世界上存在着大约四十余种现场总线，如 FIP、ERA、Profibus、LONWorks、InterBus、CAN、HART、Dypline、P-net、F-Mux、ASI、MODBus、SDS、Arcnet；国际标准组织-基金会现场总线 FF: Field Bus Foundation, WorldFIP, BitBus，美国的 DeviceNet 与 ControlNet 等等。

(5) Ethernet 以太网和无线网络。以太网具有应用广泛、成本低廉、通信速率高、软硬件资源丰富、发展潜力大等优点，正逐步在自动化中得到应用。无线网络凭借灵活的短距离连接已广为使用。

2.3.2 网络集成

测控网络的信息化必须实现与信息网络的集成，也是实现数据统一管理的基础，各

种网络、总线、接口各有所长，适合与不同的现场情况，需根据实际情况进行选择。网络集成环境下，数据采集、监测与控制既各自独立又相互联系，达到对测控任务的实时性、完整性、同步性和互操作性管理，实现了测控系统的信息共享、远程监测、故障诊断、远程维护等功能。不仅降低了投入成本，而且提高了应用、管理水平。

通过硬件转换接口、采用统一的协议标准、采用中间件、采用 DDE 技术等方式均能实现测控网络与信息网络的集成，方式灵活且各有特点^[21]。具体内容如下：

（1）通过硬件转换接口。这种方式是通过底层网段与中间监控层之间加入中继器、网桥、路由器等专门的硬件设备，功能较强，但实时性较差，转换接口将成为实时通信的瓶颈，现有的总线测控系统大多采用此种方案^[22]。

（2）采用统一的协议标准集成。在不增加硬件设备的基础上实现系统集成可有统一的协议标准完成，而且简化了设计方案，提高恶劣信息传输的实时性和可靠性。但是当前多种现场总线、信息网络共存，传输能力各不相同，所以这种方式还需提高其兼容性。

（3）采用中间件技术集成。中间件是一种独立的系统软件或服务程序，具有开放接口标准。在网络化测控系统中，测控节点、测控设备、数据资源、数据库、应用软件和网络协议存在差异，中间件技术则可互联、互通和互操作这些单元，并能够灵活控制数据源的通信。中间件技术不必考虑底层细节和差异，实现协作处理和资源共享，达到对不同软硬件之间的兼容。

构建中间件集成测控网络需要灵活的体系结构，关键在于定义体系结构和实现功能的标准规范集，目前应用广泛的中间件标准规范有 CORBA（Common Object Request Broker Architecture，公共对象请求代理体系结构）、ActiveX、DCOM（Distributed Component Object Model，分布式组件对象模型）、RMI（Remote Method Invocation，远程方法调用）。

（4）采用 DDE 技术集成。DDE（Dynamic Data Exchange，动态数据交换）是一种 Windows 系统中进程间的通信机制，建立在 Windows 内部的消息处理机制上，其实质是各应用程序间通过共享内存来交换信息^[23]。DDE 易于实现，具有较强的实时性，适合配置简单的小型系统。

2.4 网络化测控系统组成

网络化测控系统是基于网络的分布式测控系统。它是微电子、网络、仪器仪表等多

方面技术的有机组合，通过网络实现资源共享、协同工作、远程应用，具有智能化、网络化、交互性等特征。网络化体系结构主要由系统硬件和应用软件组成。

2.4.1 系统硬件结构

网络化测控系统主要由包括网络化传感器、网络化仪器、网关、PC 仪器、PXI 和 VXI 计算机等组成的基本功能单元以及连接各基本单元的通信网络两部分组成，如图 2.1 所示。

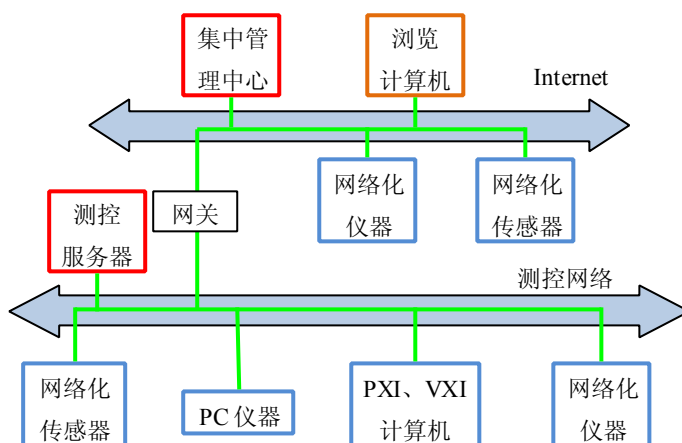


图 2.1 网络化测控系统硬件结构图

Fig 2.1 Hardware structure of network measurement and control system

网络化测控系统有多种实现方式，典型的系统硬件单元包括：集中管理中心、浏览计算机、测控服务器、网络化仪器、网络化传感器、网关等功能单元。具体内容如下：

（1）集中管理中心。它负责统筹管理整个网络化测控系统，进行测控任务的分配，对获取的数据进行集中运算、分析与处理，并完成数据存储、数据分析报告生成及故障诊断报警等。

（2）浏览服务器。它是装有 Web 浏览器或客户端的计算机，提供给用户进行分析数据和测量结果的查看。

（3）测控服务器。顾名思义，它负责测控任务的服务工作，例如管理信息数据网络传输，存储原始数据、测量和分析结果，而且能够完成集中管理中心的部分工作，如数据计算处理、测控任务分配、数据存储、报表生成和存储故障知识库等。

（4）网络化仪器。其中包括测控模块和各种总线仪器系统等，完成对设备的数据采集、数据交换、执行管理中心或测控服务发出的监控任务。

（5）PC 仪器。它将计算机同仪器进行软硬件融合，由相互独立的计算机、仪器仪

表整合为一个单元，即 PC 仪器。这种方式的测控功能及网络大大增强。

(6) 网络化传感器。它是网络化测控系统的底层基本单元，将网络化技术应用到传统的传感器、测控仪器上形成网络化数据采集设备，本身具有数据处理和网络传输功能。

2.4.2 应用软件组成

网络化测控系统软件包括客户端应用软件和服务器端软件组成，软件结构如图 2.2 所示。

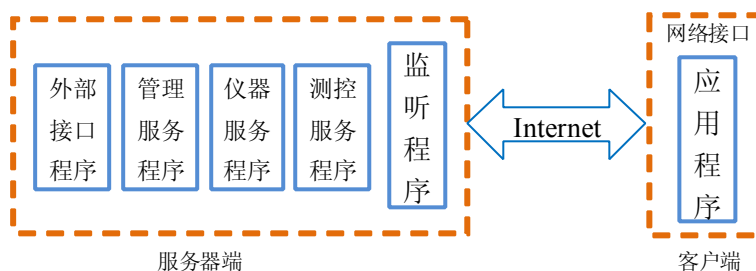


图 2.2 网络化测控系统的软件结构图

Fig 2.2 Software structure of network measurement and control system

客户端由应用程序和网络接口两部分组成。应用程序完成人机交互功能；网络接口将客户端的请求、数据及控制响应同服务器端交互，并将数据结果、执行情况显示给用户。服务器端则由监听程序、测控服务程序、仪器服务程序、仪器驱动、数据处理程序等组成。

2.5 本章小结

本章首先概述了网络化测控系统的基本概念，然后介绍了网络化测控系统的组网原则和网络集成，重点对系统的硬件结构和应用软件的组成进行了阐述，为后期系统构建提供了理论依据，同时分析了系统功能以及特点。

3 数控机床远程监测与故障诊断系统体系结构

现代科技技术不断应用于新的数控生产设备中,使得数控机床的复杂程度不断增加,需要监测的参数越来越多,其类型也是日益增加。涉及到电气、液压、机械、动力、传感器、声学、振动等等知识,数据量越来越大,同时对监测的速度、精度、实时性、可靠性、完整性、开放性等要求也越来越高,传统的单机、分布式监测诊断系统已不能满足现代设备的要求。服务网络化、数字化以及数控设备的远程操作、监控与诊断维护功能是解决这一问题的有效途径。本章对远程监测与故障诊断系统涉及的系统框架、网络构建、软件平台进行了阐述。

3.1 引言

数控机床结构复杂、涉及机电、液压气压、自动化等技术,在长期的加工生产中,由于设备老化、加工振动、温差变化、操作不当等引起的故障。为了有效的预防监测以及及时排除相关故障,需要依靠数据采集系统在数控机床的关键部位进行数据进行采集,然后分析数据参数,最终确定故障部位及原因。数控机床远程监测与故障诊断是在不拆解设备及现场维护的情况下,利用先进的数据采集系统及传感器技术,通过网络传输将数控机床的故障进行远程解决。

数控机床工作状态的数据采集与故障分析是实现其远程监测与故障诊断的核心,两者通过网络技术紧密联系构成一个整体系统。系统从现场设备、技术人员、专家、设备生产厂家等获取设备信息,并提供信息化的远程监测、设备维护、故障预报、故障分析、信息化管理等服务。系统构建的目标是能够向需要从数控机床获取信息的人员,包括企业、维修人员、设计者等远程、及时、准确的提供生产信息、维护帮助、全生命周期管理等帮助,还可与其他制造业信息化软件融合。

实现跨地域的网络化远程监测与故障诊断服务系统,需要将现场数据采集系统、信号分析处理个故障诊断专家系统共同构建到网络化运行平台之上,可按层次分为设备层、监测与故障诊断服务层、人机交互层。

设备远程监测与故障诊断的内容包括工作状态监测、数据分析诊断及故障识别处理

三个方面，其流程图见图 3.1 所示。

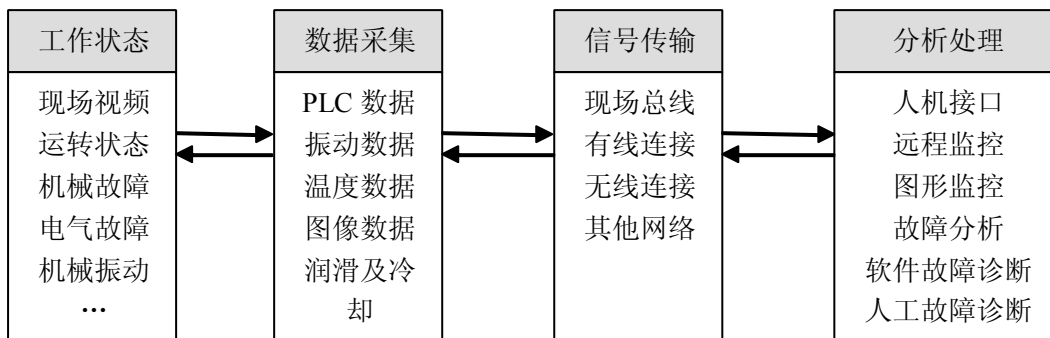


图 3.1 远程监测与故障诊断流程图

Fig. 3.1 Remote monitoring and fault diagnosis flow chart

其中需要解决远程数据采集及信号分析处理系统在网络环境下的运行，针对数控机床繁杂的数据量以及实时、快速、准确的传输要求，需要对监测数据进行优化处理，简化数据，以保证实时高效的数据信息传递。具体实施过程可分为四个步骤：

(1) 确定远程监测与故障诊断的需求及采集数据的内容。主要工作包括确定正常运行状态下的参数信息、监测信号类型、数据采集方式、功能指标等方面内容，其中要考虑到设备的结构形式、功能特点、环境因素、传感器类型、设备或知识重用等技术条件。这一部分关系到后续系统构建的完成性和可靠性。

(2) 数据实时采集系统构建。根据需要监测的信号种类，选择相应的传感器，确定测点位置及数据采集系统，使用合理有效的采集系统，获得分布于不同检测位置的传感器并对数据进行处理分析，如振动、温度、位置、位移、数控系统工作状态等信息。组建系统时不仅要考虑到信号获取的位置、精度、方式及多传感器融合，还应考虑系统的重组性、扩展性及可靠性。

(3) 信息处理。从传感器得到的数据包含大量的信息，对数据进行滤波、剔除数据噪声、数据进行数值分析运算等数据处理，并对数据进行分类处理、加工和保存，从而获得易于理解和分析的信号特征参数，例如振动信号的时域及频域分析。

(4) 异常或故障状态识别。将分析处理后的数据按照一定的判断规则和匹配策略同正常工作状态下的参数进行比对，从中分辨出异常信号特征，以此来确定设备的工作状态、故障原因、发展趋势等。

(5) 故障处理控制决策。根据对异常或故障数据的分析，完成故障的识别、推理，确定故障原因和位置，并按照不同的匹配原则对异常或故障进行处理，例如更改加工程

序、报警、停机等，并对相应的处置过程进行保存、以便对复杂故障进行远程专家会商，后续还需要进行趋势预测和报表生成。

上述监测与故障诊断是一个完整的信息过程，符合信息论提出的信息获取、信息处理、信息再生和信息施效的定义，是一个信息运动的过程^[24]。其中设备工作状态的数据采集是信息获取，信号处理分析、状态识别是信息再生，故障推理及控制决策时信息施效。

3.2 远程监测与故障诊断系统的框架结构

远程监测与故障诊断是针对制造业中大型、复杂、高技术设备分布的特点，通过现场数据采集系统、网络、通信及故障诊断系统，将分布、独立的设备联系为相互协作的有机体，以实现状态监测和故障处置的及时响应，并具有资源共享、远程协作、数据交换等功能。

3.2.1 远程监测与故障诊断系统总体结构

远程监测与故障诊断系统组建中可供使用的技术、网络、仪器、软件等多种多样，目前并未制定统一的模式和标准。其大体工作机制为：在需要进行测控和诊断任务的关键设备上建立数据采集系统，采集设备工作信息；而在技术、分析能力较强的部门建立远程分析诊断中心，负责对采集数据进行分析、故障诊断、决策与控制，还可与其他诊断中心进行协作，二者协作完成设备的远程监测与故障诊断。

基于 Internet 的网络化故障诊断系统克服了以往专家系统的发展瓶颈，实现了远程、可扩展、多专家、多系统协同诊断，降低了系统组建和维护成本，并提高了系统的可靠性、准确性。根据网络化测控技术的系统构建要求和原则，远程监测与故障诊断系统如图 3.2 所示。系统由数据采集系统、故障诊断专家系统、远程监测与故障诊断三部分结构组成，为达到跨地域、多领域与专家、多系统的协同监测和诊断，利用故障诊断技术与网络技术融合、测控网络与信息网络融合及数据传输，实现数据分析和故障诊断地统一管理，提高了系统的开发性、实效性、准确性、可靠性等性能。

网络化远程故障诊断系统与传统的故障诊断系统封闭式结构不同，其知识库、故障推理机必须是开放式的，只需设计者完成系统的框架，其中的知识、规则、推理等内容可以通过维护人员、用户、专家、机器自学习等多种途径不断完善。

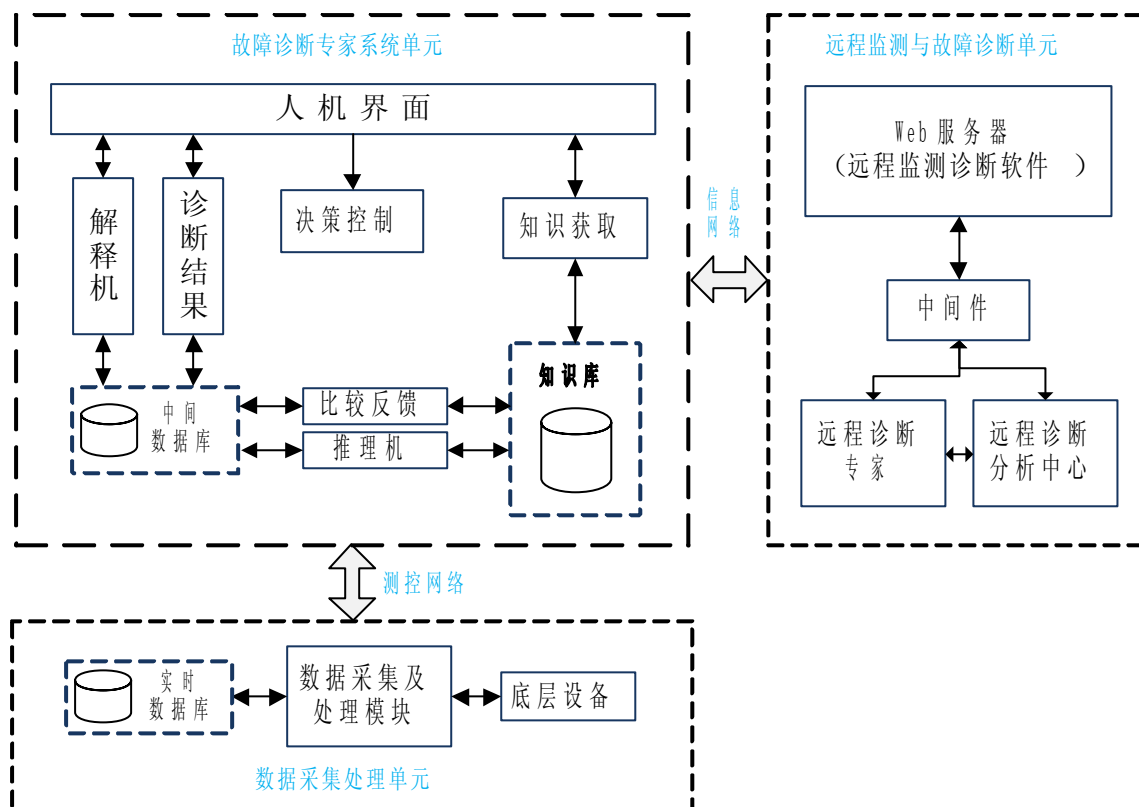


图 3.2 远程监测与故障诊断系统的总体结构图

Fig 3.2 Structure diagram of remote monitoring and fault diagnosis system

3.2.2 远程监测与故障诊断系统功能模块划分

远程监测与故障诊断的最大优势在于跨地域性实现测控与诊断任务，其间涉及信号采集、信号分析、故障识别、专家系统、网络传输等技术问题，其主要功能模块也是为按照这些关键点进行划分。主要模块如图 3.3 所示。

(1) 信号采集模块。系统的信号采集应处于网络环境下，根据测控任务或目的对被测设备工作状态的信号进行采集。采集系统包括传感器、变送器、信号处理软硬件，检测信号有压力、温度、振动、声音、图像、应变位移、位置、PLC 系统信息等数据，采集模块的构建应考虑信号类型、传感器配置、被测设备结构、数据指标、传输要求等因素。

(2) 数据处理模块。现场采集系统获取数据后需要进行处理加工以便符合系统对数据分析、存储传输的要求，比如剔除噪声、数模转换、格式转换等方式。其关键技术在于数据处理模块的硬件和应用程序设计。

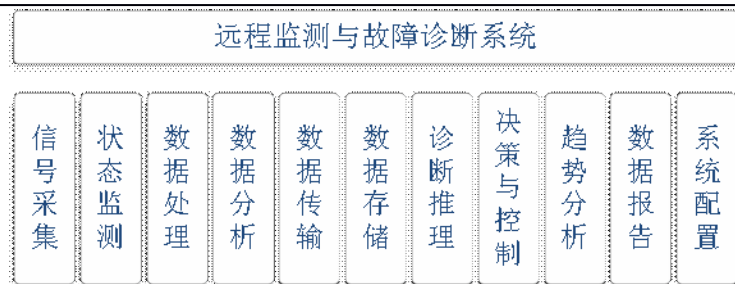


图 3.3 系统功能模块

Fig 3.3 The function modules of system

(3) 数据分析模块。根据信号种类，例如能量信号与功率信号、时域信号与频域信号，按照采集系统的需求运用信号分析方法进行运算，分析方法主要有时域分析、频域分析、小波分析、功率谱分析、相关分析等。

(4) 数据传输模块。此模块负责现场数据采集模块与远程监测故障诊断中心的数据通信，根据信号的不同种类、传输特征、技术要求等合理安排传输方案与资源分配，保证数据传输的安全性、可靠性、及时性等。

(5) 数据存储模块。数据存储包括很多数据库，主要有现场数据采集系统数据库、中间数据库、远程服务数据库、专家系统数据库（知识库、事实库、决策库、解释库）等，存储的数据量也是巨大的，合理安排数据存储、准确快速提取、系统数据交互等均有数据存储模块完成。

(6) 故障诊断推理模块。故障识别的核心是诊断推理，模块的关键技术包括特征提取技术，特征提取的主要任务是将检测得到的状态信号进行进一步分析处理，去掉其中的噪声和冗余信息，强化和提取故障特征信号；模式识别技术，模式识别的任务是将待检测模式与标准模式进行比较，明确其所属类别，为此需要建立判别函数，规定判别准则^[25]。

(6) 决策与控制模块。设备异常与故障信号经过识别、推理、解释、故障原因及位置确定等操作后需要进行故障的排除。决策与控制是建立在信息获取的基础上，然后相应给出合理的控制方式和故障排除策略。

(7) 其他模块。系统构建还应包括其他辅助模块，如：趋势分析、数据导出、报表生成、用户管理、系统配置、安全管理、网络配置等等。

3.3 远程监测与故障诊断系统网络体系结构

远程监测与故障诊断系统是一个网络化信息交互和信息共享的开放式系统。现有的网络模式有 Client/Server 模式、Browser/Server 模式、公共对象请求代理体系结构以及 C/S 与 B/S 混合模式的网络测控结构。

3.3.1 基于 Client/Server 模式的网络结构

Client/Server（客户机/服务器）模式的结构，是充分利用两端的硬件环境，将应用任务分解成多个子任务，分配到有多个客户机和服务器端进行协同工作。基本工作原理是：客户通过远程调用（RPC）或直接请求服务器应用程序提供服务，服务器执行完请求后，将数据和结构返回客户机。客户端负责实现用户接口功能，同时封装了部分或全部的应用逻辑。服务器的数据库服务器主要提供数据存储功能，也可以通过触发器和存储过程提供部分应用逻辑^[26]。基于 Internet 的 C/S 模式监测与故障诊断系统结构图如图 3.4 所示。

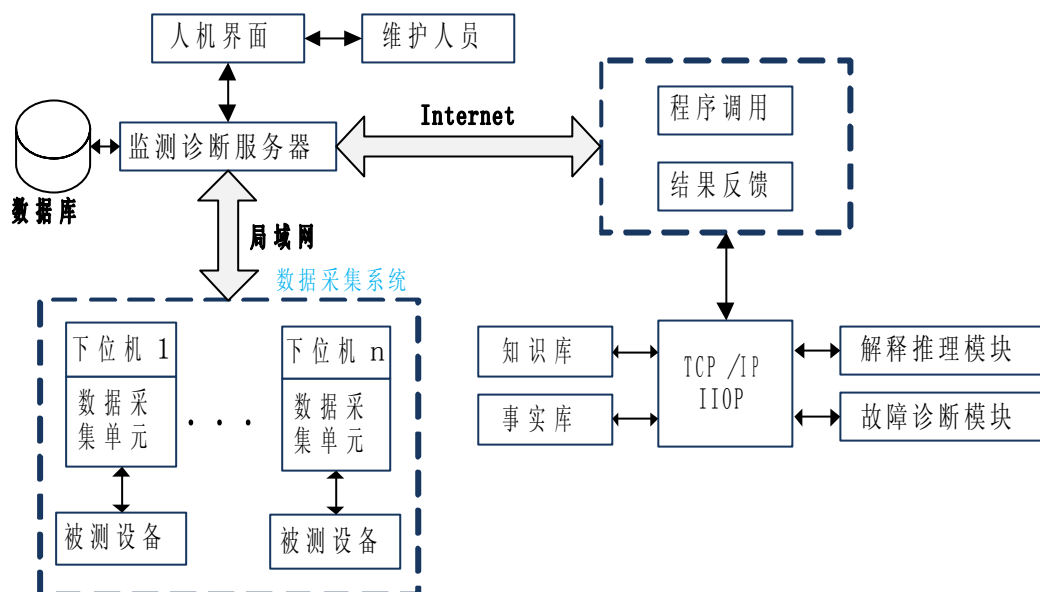


图 3.4 C/S 模式的远程监测与故障诊断结构图

Fig 3.4 Remote monitoring and fault diagnosis chart of C/S mode

在图 2.1 中，重要信息的存储主要由监测服务器负责，并为数据采集系统、维修人员及网络用户提供服务；数据库用来存储数据采集系统上传及向外界发布的实时数据和历史数据，数据可供重复调用和深度分析，以进一步掌握设备的实时工作状态和故障信息。客户通过客户端从现场数据采集系统、数据库中获得数据信息，依靠自身的故障诊

断系统进行分析，具有快速方便、准确可靠的优势。

这种 C/S 模式的系统具有多种优势，首先系统将工作任务进行分散，降低了应用服务器的运行负载，能够快速响应应用请求。其次，由于数据的管理和存储是由客户端和服务端独立完成，数据较为透明。但是系统本身存在建设投入成本较高、数据存储分散无法达到数据资源完全共享、维护任务大、系统开发升级较慢、安全性低等劣势。

3.3.2 基于 Browser/Server 的网络结构

Browser/Server（浏览器/服务器）模式的结构，是随着 Internet 技术的兴起对 C/S 结构的一种变化或者改进^[27]。B/S 体系结构将事务处理任务从客户机中独立出来，交由单独的服务器进行处理，这种将大部分应用功能集中到服务器中运行，简化了客户机的负载，变为只是浏览、交互信息的人机接口。其中融合了不断发展的 Internet 技术、网络编程语言、第三方插件等新技术，用简单的浏览器完成复杂任务的处理工作。这种方式具有开发简单、维护升级方便、成本降低、构建方式多样等优点，但是应用服务器运行数据负载较重。B/S 模式的远程监测与故障诊断结构如图 3.5 所示。

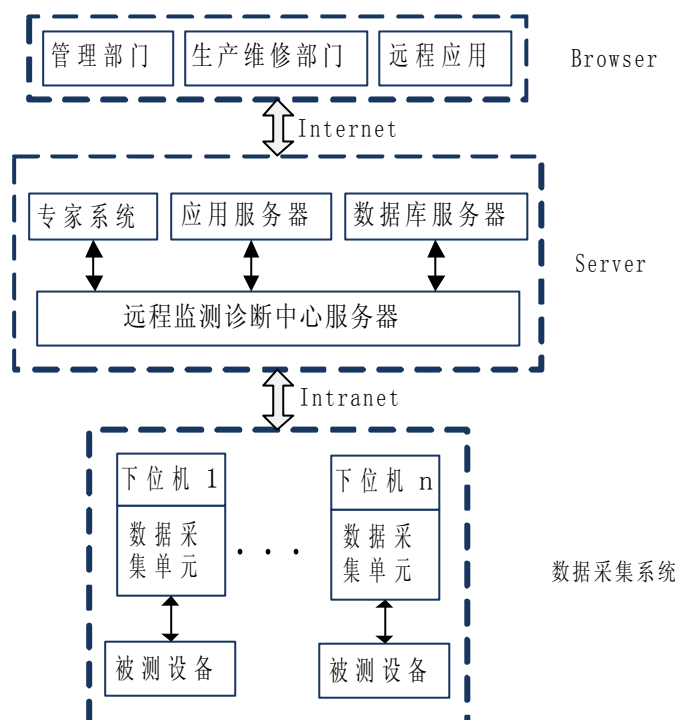


图 3.5 B/S 模式的远程监测与故障诊断结构图

Fig 3.5 Remote monitoring and fault diagnosis chart of B/S mode

B/S 模式结构将功能表示、应用支持、数据资源分配到不同的层次单元中，部分事务在前端实现，但是主要事务在服务器端实现。功能表示层有浏览器和 Web 服务器

组成，为远程应用服务、管理维修部门提供帮助支持，将浏览器的发出的用户请求交由应用服务器处理；应用层由应用服务器、专家系统、数据分析处理等模块组成，处理过程中使用数据资源层的信息数据进行处理、分析和应用服务；数据资源层依靠数据库完成对数据采集系统及应用层的数据传输、存储和管理。

3.3.3 公共对象请求代理结构

CORBA（Common Object Request Broker Architecture, 公共对象请求代理体系结构, 通用对象请求代理体系结构）是由 OMG 组织制订的一种标准的面向对象应用程序体系规范^[28]。这种结构模式是为解决分布式处理系统中不同软硬件互联而提出的组建方案，是一种跨平台的接口和规范，与软硬件平台、编程语言和网络协议无关。

在基于现场总线技术的远程测控系统结构基础上，依据 CORBA 模式的不同实现位置，将 CORBA 体系结构分为两种模式。CORBA 可以每台现场设备作为服务器的直接访问模式和通过连接总线网络的网关或是网关间接提供 CORBA 服务的代理模式。如图 3.6 所示。

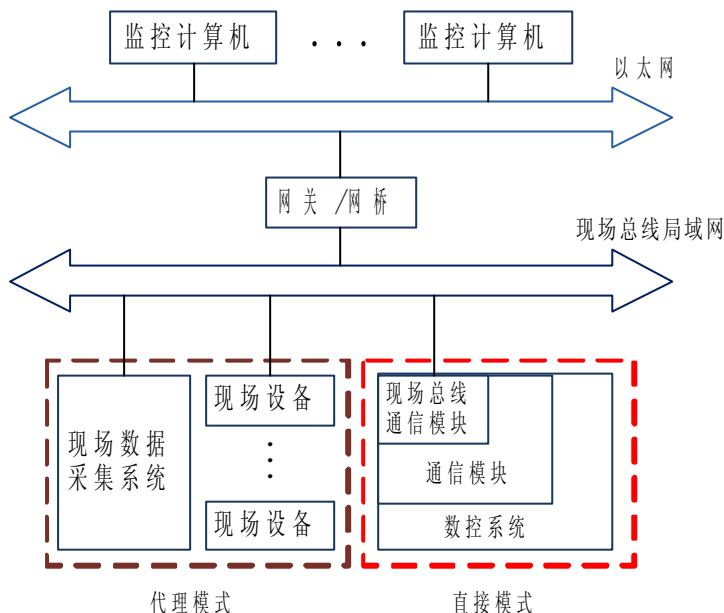


图 3.6 CORBA 模式结构图

Fig 3.6 CORBA mode chart

CORBA 模式监测服务系统分为三个层次，即现场数据采集层、通信代理层和远程监测控制层。系统通过通信代理层，将建立在设备现场的监测点、预处理系统连接客户

端的远程监测与故障诊断服务中心进行信息交流。

CORBA 模式的工作过程为：现场数据采集层首先对被测设备的状态信息进行采集、自动测试并进行预处理，将数据信息发送到现场服务数据库进行故障识别、推理和诊断；对于无法解决的复杂故障问题，通过通信代理层向远程监测与诊断中心发送帮助请求，有远程故障诊断模块协调专家系统、技术人员对故障进行综合比较、分析、判断，确定故障原因及处理对策。在工作过程中，系统传输的仅仅是与故障相关的数据信息，数据量降低，提高了网络传输的速度及可靠性。除此之外 CORBA 技术还具有以下优点：

（1）故障诊断知识、数据信息共享程度高，能够快速整合网络信息资源。

（2）通过网络应用，不同地域的多领域专家协同工作，实现了快速、准确、可靠的故障协作诊断。

（3）系统本身即是跨平台结构形式，同软硬件平台、编程语言和网络协议的交互消除了异构障碍。

（4）CORBA 技术提供了标准化体系结构的对象描述和公共接口，在不需要改变系统软件结构的前提下完成对诊断系统的修改、维护、升级、集成并提供对外服务。

3.3.4 基于 C/S、B/S 混合模式的测控系统结构

科学技术日新月异，制造业正在大规模制造、集成制造、分布式制造、大规模定制技术，其中涉及的制造设备种类繁多、结构复杂、技术先进，而且多分布于不同地域及领域。在对这些进行状态监测、性能测试、故障诊断、功能应用过程中，需要获取、共享、发布、交换的信息对测控系统要求高，仅仅由 C/S、B/S、CORBA 模式组建的单一模式结构网络化测控系统无法胜任，因此多层复合型体系结构应运而生。对数据量大、交互性强、安全性、范围小且地点固定等要求较高的功能部分适宜采用 C/S 模式；而功能变动频繁、地域广且地点灵活，仅用于信息发布、用户浏览的功能部分则采用 B/S 模式。

本系统组建了由 Internet 监测诊断级、工厂监测诊断级、车间监测诊断级和现场设备级四层网络级别的 C/S、B/S 混合模式远程监测与故障诊断系统。体系结构图如图 3.7 所示。

现场设备级由数据采集系统、现场监控站、通信模块、分布式 I/O、传感器等组成，用来采集数控机床的状态信息和初步处理原始数据，负责与上层级别进行通信传输，并完成设备级信息融合任务。测控任务可由多个采集系统分解完成或集中完成，而且响应

上级系统的决策与控制命令。

车间监测诊断级是整个监测与诊断的核心，应用功能最多，因为这一级既完成数据采集级的数据分析处理任务、又向上一级发布测控结果，C/S 与 B/S 混合模式主要在这一级得到应用。构建完善的车间监测诊断级与现场设备级是实现远程测控网络的关键，决定着系统的完整性与实际应用性。

工厂监测诊断级是全厂测控管理中心。这一层的测控任务较轻，可采用 C/S 模式或 B/S 模式构建，主要负责数据处理后的整理、报告、再分析等工作，为 Internet 监测诊断层发布数据并协同下一级实现远程应用功能，还可与 OA 系统、PLM 系统、财务管理等工厂信息化系统结合。

远程监测诊断中心一般采用 C/S 模式，可消除地域差异，随时获得车间级的工作数据，可实现远程专家会诊、网络会议、在线支持、人员培训等网络化应用功能。

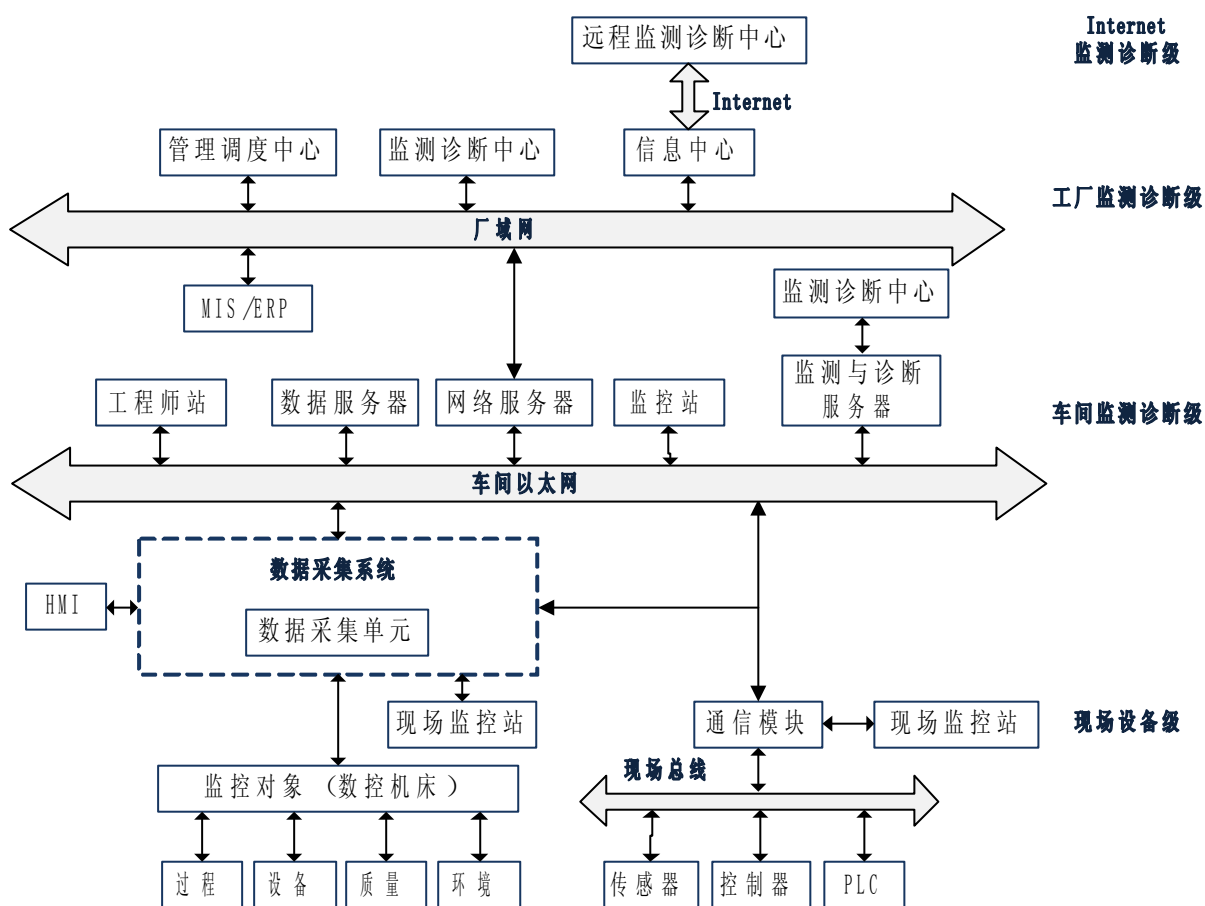


图 3.7 B/S 与 C/S 混合模式的测控结构

Fig 3.7 B/S and C/S mixed mode of measurement and control structure

该四层网络级别的 C/S、B/S 混合分布式模式测控系统结合 C/S 和 B/S 这两种模式各

自的优势，充分运用各独立模式的优势，各层级功能相互衔接，共同完成远程监测与诊断任务。该系统方案主要有以下优势：

（1）在混合模式测控系统中，测控系统分工明确，效率提高。既有 C/S 高度的交互性和安全性，又有 B/S 的跨地域及客户端平台无关性等优势；

（2）整个系统采用层次化结构模式，容错能力强，即使单个模块失效也不会影响整个系统工作运转。不仅满足了系统的安全性要求，而且拥有良好的开放性和扩展性；

（3）系统层次清晰、分工明确、模块间相互协作、使用维护简便、易于排除故障并具有较高的自诊断、自维护与自适应能力，并降低维护任务工作量；

（4）混合模式合理的网络架构，使设备、数据、人力资源得到充分利用，系统组建投入成本降低；

（5）监测诊断网络与企业管理信息系统易于融合，信息化生产组建方便。

3.4 本章小结

本章对数控机床远程监测与故障诊断系统体系结构进行了分析，首先概述了系统的组成及特点，然后对系统的框架结构和功能模块的组成进行了说明，最后介绍了系统的网络系统结构，详细地分析了 C/S、B/S 混合模式的测控系统结构在数控机床远程监测与故障诊断上的应用。

4 自动检测技术研究与应用

检测与传感是实现状态监测、自动控制、自动调节、远程管理、故障诊断的关键环节，它与网路测控系统的连，并将检测到的信号输送到数据处理及分析部分，是获取、监测、处理与传输的关键部分。

4.1 引言

检测技术是以获取对象的信息数据为目的，从反应某一信息的多种信号中挑选出合适所处条件的表现形式，通过信息转换以及信息处理等过程、确定信息表达的内容、对应关系以及寻求最佳的采集、交换、处理、传输、存储、显示等方法和相应设备^[29]。

自动检测系统中包含被测量、传感器、测量电路、执行机构等，主要完成自动测量、监控、计量、保护、信号处理、故障诊断、系统维护等任务。完整的检测系统通常由传感器、测量电路、计算机处理和显示记录等部分，分别完成信息获取、转换、处理和显示等功能。如图 4.1 所示。

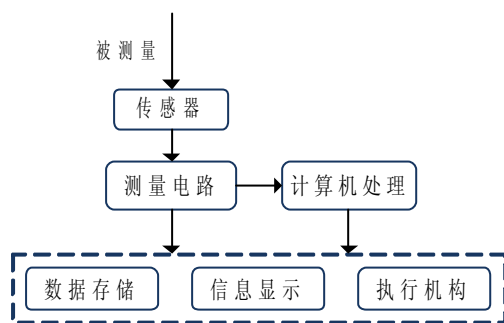


图 4.1 检测系统组成框图

Fig 4.1 Block diagram of detection system

(1) 传感器。系统中被测量的获得主要通过传感器，并将其转换为测量电路可识别的电信号，是检测系统中的首要环节；

(2) 测量电路。传感器输出的电信号必须进行转换和信号处理，使其成为易于分析、记录、具有数学处理价值的数据形式；

(3) 计算机处理。测量电路仅仅对原始数据进行了简单的处理，但检测系统需要更多的数据，例如时域分析、频域分析、历史汇总等等，实现检测技术的自动化和智能化；

(4) 输入输出部分。包括数据的存储、数据显示、数据处理以及控制。

4.2 数据采集与传感器技术

4.2.1 数据采集技术

实现设备远程监测与故障诊断的关键技术就是数据采集、获取技术，数据采集是通过与传感器、检测设备、仪器仪表等检测设备的数据连接，将已预处理的信号输入检测系统。有效完成数据采集的前提是测量数据的可靠性、准确性、及时性、广域性等，包括连续物理量、随机物理量、图形图像等，这就要求完善的数据采集系统与技术。输入的信号类型可分为数字信号和模拟信号，如开关量、温度值、电压、电流、电阻等可供系统识别的电信号。

数据采集系统则是包括了信号、传感器、测量电路、信号分析与处理和应用软件的计算机系统或网络化系统，能够完成数据采集、分析、处理和显示任务。系统对于数据获取有诸多的要求，如实时性、准确性、高精度、容错性等，随着科学技术不断创新和应用，这些问题正在得到解决。

数据采集系统追求的主要目的有两个：一是精度，而是速度。对任何量值的测试都要有一定的精度要求，否则将失去采集的意义；提高数据采集的速度不仅仅可以提高工作效率，更主要的是可以扩大数据采集系统的适用范围，以便于实现动态测试。

4.2.2 传感器技术

传感器的定义是：能感受被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置，通常由敏感元件和转换元件组成^[30]。在利用信息进行分析的过程中，需要获得准确可靠的信息，主要途径就是传感器的使用，也是实现自动检测及控制的首要环节。

在以自动化生产为标志的现代化工业中，为达到自动化设备的良好运转和维修管理，需要使用各种传感器采集、分析、监视和控制生产过程中的各个参数。在实际应用中各种设备和传感器的结构、性能指标、环境要求等各不相同，因此需要对传感器的性能指标有所限定，如可靠性、量程、环境要求、动静态特性、抗干扰能力等。如果未达到相关要求将无法正确反映信息参数，系统的准确性也无从谈起。

自动化技术的不断演进使传感器广泛应用众多领域，诸如工业生产、能源探测、交通运输、环境保护、安全检查、故障诊断、生物工程等等^[31]。传感器技术在推动经济发

展、技术革新上有着明显的重要作用，在一些工业技术领域，传感器关键技术的发展一直处在前列。传感器技术的发展趋势主要体现在技术性能和新技术应用上，其测量精度、量程范围、适应能力、寿命和可靠性不断提高，发展趋势主要体现在下列方面：

(1) 微型化、集成化、模块化；

(2) 智能化、网络化。智能化传感器是将一个或多个敏感元件、精密模拟电路、数字电路、微处理器(MCU)、通讯接口、智能软件系统相结合的产物，并将硬件集成在一个封装组件内。该类传感器具备数据采集、数据处理、数据存储、自诊断、自补偿、在线校准、逻辑判断、双向通讯、数字输出/模拟输出等功能，极大地提高了传感器的准确度、稳定性和可靠性。由于采用标准的数字接口，智能化传感器有着很强的互换性和兼容性^[32]；

(3) 网络化。传感器的网络化是依靠网络接口和处理单元的智能类传感器。测量数据经过数字转换由网络接口实现多传感器网络融合以及同控制网络的信息融合，达到了数据交换及共享的网络化要求；

(3) 补偿和修正技术。传感器根据自身特性、工作条件、外界环境，采用适当方法补偿和修正这些因素带来的误差，提高了检测精度。如差动技术、平均技术等；

(4) 干扰抑制。传感器安装位置复杂，外界干扰难以避免，直接影响检测精度。抑制干扰一方面提供自身性能，另一方面隔离来自外界的干扰。如滤波、屏蔽、隔热、密封、隔振等等；

(5) 稳定性、可靠性。传感器多直接安装在被测设备上或长期工作中干扰情况下容易老化、精度疲劳，这就需要传感器的长期稳定性和可靠性。可以从传感器的材料、元器件、安装结构、关键部件备份等方向考虑。

4.2.3 传感器在数控机床的应用

不同种类数控机床对传感器的要求也不尽相同，需要根据具体设备的结构、工作情况、测控要求等多方面考虑。一般从实际应用来看，大型、高价值、高复杂类机床采用性能较高的传感器，相反哪些在制造系统所占权重较低的则不安装传感器或少安装。

数控机床需要监测温度、振动、位移、视频、压力、功率以及可编程处理器等，内容如下：

(1) 位移检测。用于位移检测的传感器主要应用在进给控制中，用于测定直线位移或角位移，主要有感应同步器、脉冲编码器、旋转变压器、光栅尺位移传感器等种类；

(2) 位置检测。位置传感器可用来检测被测物位置, 控制极限点的装置。位置传感器有接触式和接近式两种: 接触式结构简单、成本低、稳定可靠, 多用在导轨的两端; 接近开关与被测物无直接接触, 当物体移动至预设距离内时发出控制或报警信号的开关, 多用在自动刀库、工作台、液压缸上。根据感知方式有涡流式、电容式、光电式、热释电式、霍尔式、超声波式、微波式等种类;

(3) 速度检测。速度包括线速度和角速度, 与之相对应的就有线速度传感器和角速度传感器^[33]。数控机床的主传动系统、进给运动系统中常用到测速发电机和脉冲编码器

等;

(4) 压力检测。压力传感器是一种将压力转变成电信号的传感器^[34]。数控机床中的液压、气压传动、润滑系统、冷却系统等部分均安装有压力传感器。例如主传动部分的电主轴单元, 其涉及冷却、润滑、液力静压轴承、刀具安装等需要压力实时监测传感器, 防止故障发生;

(5) 温度检测。利用物质各种物理性质随温度变化的规律把温度转换为电量的传感器^[35]。按测量方式可分为接触式和非接触式两大类, 常用的温度计有玻璃液体式、压力式、电阻式温度计、热敏电阻和温差电偶等。数控机床中主要用到热电阻和热电偶, 安装在发热量大的主轴电机、支撑轴承、切削刀具等部位上, 实现温度超限报警、温度补偿、优化加工刀具等功能;

(6) 功率监测。功率检测是通过电压及电流传感器计算得出, 数控机床的功率监测可用于控制恒转矩切削、刀具磨损控制、以及摩擦、进给、阻塞、泄漏等均能引起功率变化的参数, 结合其他传感器共同判断故障原因;

(7) 振动监测。从振动的频率范围来分, 有高频振动、低频振动和超低频振动, 一般情况下, 低频振动采用位移, 中频振动采用速度, 高频振动采用加速度。机械设备振动多采用涡流式位移传感器、磁电式速度传感器、压电式加速度传感器。

数控机床引起振动的部位和原因很多, 主要有制造安装误差、床身固定不稳、周围设备振动、电动机激振、加工程序不合理、润滑不良等等, 需要根据采集信号进行数值分析, 如时域、频域分析等。

4.3 信号分析处理技术

4.3.1 信号定义与分类

在生活、生产实践中，人与外界事物进行信息交换，研究分析事物间的内在联系，信息的载体就是信号。信号中表达的信息是多样的，需要对信号进行测量、分析、记录，从中提取、分析出与事物的内在联系、定量关系和发展趋势。

按照性质信号可分为静态信号和动态信号两类^[36]。静态信号一般指稳定状态下的信号，其幅值大小和方向不随时间变化，如应变、拉压力、位移；动态信号主要指幅值大小甚至方向随时间变化的信号，是过渡过程中随时间变化的信号。如图 4.2 所示。

4.3.2 信号分析与处理技术概述

对设备进行监测与故障诊断，以便了解设备状态与故障维护工作，设备信号分析技术尤其重要。

信号分析与处理的目的是通过对原始信号的数学变换、加工、解析、统计等，把信号变为表达有效信息的形式，实现系统的特定目的，是自动检测系统进行设备工作状态获取、监测与故障诊断的重要手段和关键技术。通过对信号的分析与处理，对信号进行深入的特征分析，得到信号的参数及特征，如除噪滤波、将复杂信号分解为若干简单信号进行微积分变化。

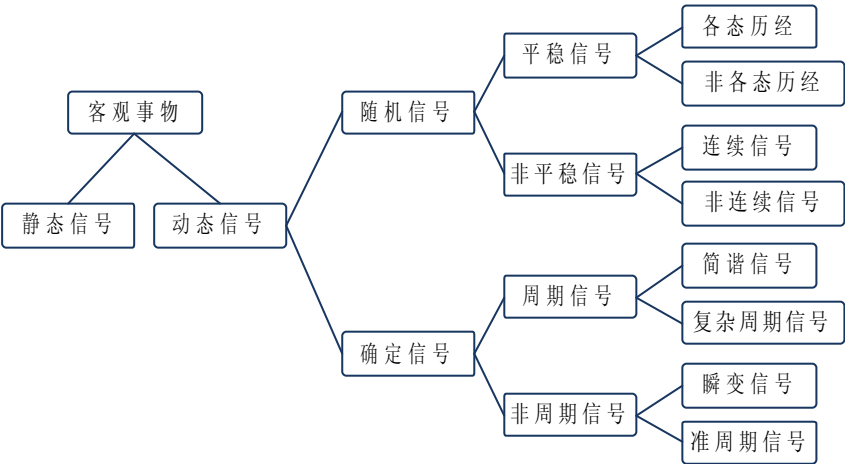


图 4.2 信号种类
Fig 4.2 Signals type

在机械设备工作过程中会产生多种信号类型，系统应能采用不同的分析方法或混合

多种方法从尽量少的信号中分析中有用的数据，以便提高给其他系统使用。

4.3.3 信号分析方法

1) 时域分析

直接在时间域内对系统动态过程进行研究的方法^[37]。时域分析对获取的时间历程信号直接进行数学运算且结果仍属于使用范畴的信号分析方法，由于是直接在时间域中对系统进行分析的方法，所以具有直观和准确的优点。时域分析从微分方程角度判断出系统运动的主要特征，分析系统的运动规律。系统在零初始条件下，一般都利用传递函数进行研究，用传递函数间接的评价系统的性能指标，具体是根据闭环系统传递函数的极点和零点来分析系统的性能^[38]。

时域分析主要包括以下分析类型：

(1) 波形分析。时间波形最为直观，多用于初级诊断，例如数控机床主轴转子的不平衡引起的振动一般都是时间波形。对于单一的不对称引起的振动波形基本上为正弦的，波形特征稳定、光滑、重复性好；而由轴承故障引起的振动波形则比较杂乱、毛糙、波动大。

(2) 相关分析。将设备运转相同步的周期信号进行时间信号的平均。这种技术可以消除外界噪声，易于发现非精确同期的周期信号，多用于多轴齿轮传动故障诊断。

(3) 相关分析。相关分析又称时延分析，包括自相关和互相关分析，用于描述信号在不同时刻的相互依赖关系，是提取信号中周期成分的常用手段。

(4) 其他分析还包括时序分析、轴心轨迹分析等。

2) 频域分析

设备状态监测与故障诊断中常用的方法就是进行信号的频域分析。对于动态信号来说，时域信号是以时间为自变量的信号，而信号的自变量为频率的则成为频域信号。

用时域分析法分析和研究信号最为直观和准确,但有时一些信号不仅随时间变化，还同频率、相位有关，信号的响应随频率的变化而变化。需要对频率结构进行分析，并描述信号在频率域内的变化。频域分析把时域信号变换成频域信号进行分析的方法称为变换域分析，即把通过傅立叶变换或傅立叶级数分解把时域信号的横坐标从时间变为频率，从中求得时域信号中频率成分的幅值和相位信息。周期信号靠傅立叶级数，非周期信号靠傅立叶变换。

3) 幅值域分析

统计特征参量分析也称信号幅值域分析，是用来计算信号幅值的变化、波动的大小以及能量分布规律。信号幅值域参数包括概率密度函数、概率分布函数、均值、均方值、有效值、方差和标准差、直方图、最大最小值、偏态指标和峭度指标^[39]。

通过对幅值域参数的运算，即可较好地判断机械设备的运行状态，如方差和标准差的分析，当机械设备运行正常时，其输出信号一般较为平稳，信号的方差和标准差值也较小，因此根据方差和标准差值的大小可判断机械设备的运行状况^[40]。

4) 频谱分析

将信号源发出的信号强度按频率顺序展开，使其成为频率的函数，并考察变化规律，称为频谱分析^[41]。信号频谱分析为查找设备故障开辟了新的领域，例如应用在振动和噪声故障诊断分析上，设备正常运行时具有一定的特征频率，如果出现机械故障或异常，设备会出现振动、噪声等故障现象，同时会产生新的谱线或引起幅值变化，对照着系统正常状态的频谱特征，就可以快速准确的排除出故障。

目前，频域分析法已成为机械设备故障振动诊断的主要内容，其主要分方法有幅度谱分析和功率谱分析，包括幅度谱分析及功率谱分析^[42]。

5) 时序分析法

时序分析，它把依时间变化的信号排成一定的时间序列，查找出某个变量的当前值与其过去值之间存在的关系，分析辨识时间序列或产生这一时间序列的系统。

时间序列按平稳性基本上可以分为平稳时序和非平稳时序。平稳时序主要是指宽平稳时序，它要求均值函数为常数，自协方差函数与起点无关。非平稳时序则要求联合分布函数与起点无关。

6) 小波分析

小波分析，是一种包含尺度伸缩和时间平移的双参数的函数分析方法^[43]。小波分析使用傅里叶变换的局部化方法，进行时空序列分析，因此具有良好的时频局部化特性和自适应变焦距与多尺度分析能力，能够有效的从信号中提取信息。解决了傅立叶变换不能解决的许多困难问题。

4.4 虚拟仪器技术

4.4.1 虚拟仪器技术概述

随着虚拟技术、计算机技术和通信技术的飞速发展，仪器仪表经历了模拟仪器到数

数字化仪器、嵌入式仪器 and 智能仪器的发展，不断采用新技术、新理论，功能及作用发生了飞跃式进步。在计算机技术与测试技术日趋紧密的发展背景下，由美国国家仪器公司 (National Instruments Corporation，简称 NI) 提出了全新的“虚拟仪器，Virtual Instrumentation”概念，拓展了测控技术模块化、数字化、智能化、信息化的发展空间。

虚拟仪器是基于计算机的仪器^[44]。传统的测试仪器的分析处理功能主要是由硬件系统实现，缺点是独立使用、手动操作，功能固化和重复，而虚拟仪器是基于虚拟技术、计算机技术及智能仪器技术的系统，主要功能是由应用软件实现的，即“软件即仪器”。虚拟仪器作为统一化硬件平台，充分发挥了计算机技术在运算、存储、网络、软件等方面的优势，系统的硬件只是作为数据的输入与输出单元，数据分析、通信、人机交互则由应用软件灵活布置。虚拟仪器的出现，改变了传统仪器的缺点，具有成本低、扩展方便、易维护、功能软件化、模块化、硬件接口标准化、计算机可视化、信息软件融合化、程序设计图形化等特点。虚拟仪器信号测量流程如图 4.3 所示。

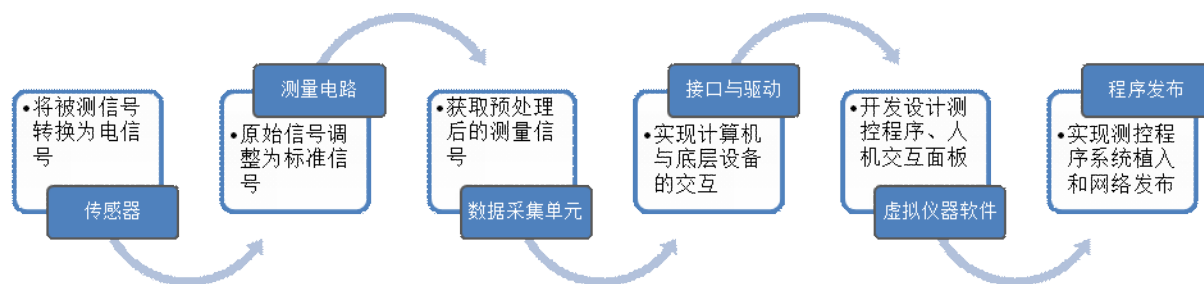


图 4.3 虚拟仪器信号测量流程图

Fig 4.3 Flow chart of signal measurement by VI

4.4.2 虚拟仪器的结构

虚拟仪器系统采用高性能、可扩展、模块化的硬件以及灵活、高效、易开发的软件，能够轻松快速的完成系统测试、数据采集、自动化应用等自动检测系统。高性能、可扩展、模块化的硬件能够全面满足各种测试系统、传感器、信号种类的要求；灵活、易于开发、高效等软件充分发挥了计算机在运算、数据分析、人机交互等自动化应用方面的优势。

虚拟仪器主要由三部分组成，即硬件设备、驱动软件、虚拟测控面板。其中，硬件设备包括自动检测系统的各种设备，如计算机、总线仪器、传感器、自动化设备等；驱动软件是对接入计算机的硬件设备进行管理、配置、控制、应用、通信的底层设备驱动

程序；虚拟仪器面板是借助虚拟仪器软件实现的人工交互的计算机界面，利用各种编程语言，达到与硬件设备的虚拟化交互。这三个主要部分的连接与通信均有计算机接口、网络通信等实现，真正达到“软件即仪器”的虚拟仪器概念^[45]。如图 4.4 所示。

1) 虚拟仪器系统的硬件构成

虚拟仪器的硬件系统由计算机硬件平台和输入/输出设备平台组成。

计算机是硬件平台的核心，它可以是各种类型的计算机，如工作站，台式、便携式、嵌入式计算机等。它管理着虚拟仪器的软件资源，完成系统的数据存储、信号处理分析、人机交互、网络应用、信息融合等应用功能，因此是虚拟仪器的硬件基础。

输入/输出设备负责输入信号的采集、放大、模/数转换、输出、控制等，诸如传感器、信号调理器、数据采集器等。目前，较为常用的有 DAQ、GPIB、VXI、PXI 和串口总线五种标准体系结构。

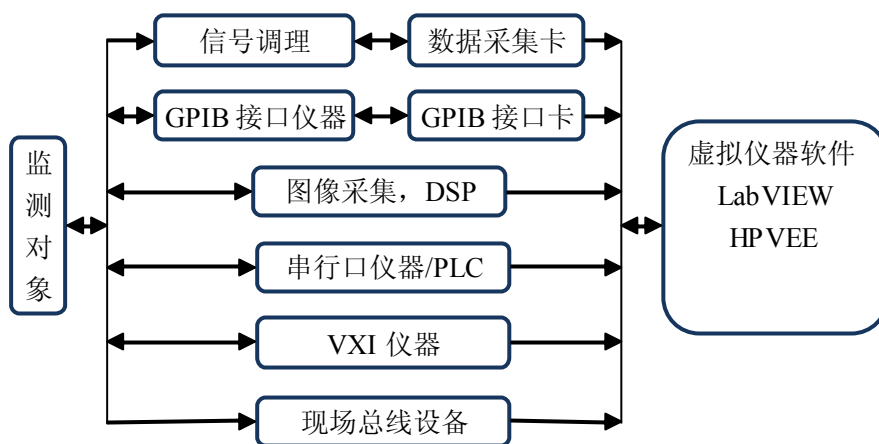


图 4.4 虚拟仪器组成框图

Fig 4.4 The structure of virtual instrumentation

2) 虚拟仪器系统的软件构成

测试软件是虚拟仪器的主体，是实现“软件即仪器”的关键。虚拟仪器测试系统开发者和使用者根据不同测试任务的要求在虚拟仪器软件的帮助下完成系统构建和应用。虚拟仪器使用强大的程序设计，用程序语言取代测试硬件的某些功能，使得计算机直接参与数据信号的产生、处理和输出，简化了传统测试系统的硬件及软件设计、降低了成本、增强了系统的灵活性。

虚拟仪器测试系统的软件由以下四部分组成：

1) 仪器面板控制软件：

仪器面板控制软件对整个测试系统进行管理，依靠计算机强大的图形化编程环境，使用可视化的技术实现了人机交互功能，是用户与仪器之间交流信息主要途径。用户可以方便地根据自己的需要组成自己的一套测试仪器，完成相关界面设计。

2) 数据分析处理软件

计算机在数值运算上具有强大的优势，通过各种计算分析软件来建立测试系统对输入信号的分析处理功能，虚拟仪器还可以结合信息化软件，完成数据统计、报表、图表等信息化功能。

3) 仪器驱动软件

虚拟仪器驱动程序是处理与特定仪器进行控制通信的一种软件。是用户完成对仪器硬件控制的纽带和桥梁。驱动程序一般分为两层，底层是仪器的基本操作，如初始化仪器配置仪器输入参数、收发数据、查看仪器状态等。高层是应用函数层，它根据具体测量要求调用底层的函数。

4) 通用 I/O 接口软件

I/O 接口软件处在虚拟仪器系统的软件结构中，起到桥梁和纽带的作用。作为系统集成、融合的关键技术，需要模块化和标准化的结构。目前，应用广泛的是 VXI（开放式测量系统）总线系统，具有自底向上的 I/O 软件模型和仪器硬件接口无关性，缩短了开发周期，并提高了其易于开发和扩展的优势。

4.4.3 网络化虚拟仪器

网络具有布置灵活、结构多样、跨地域、信息资源共享等诸多优点，虚拟仪器也随之网络化不断应用到测控系统中的趋势同网络功能相结合。虚拟仪器的连接从简单的板卡式扩充为功能分散但网络化应用集中的网络化虚拟仪器系统，网络将计算机、外部设备、应用软件以及数据信息等资源共同纳入其中，进行网络化应用、网络信息系统融合和任务分解或协同等工作，实现了对现场测试任务的异地或远程控制、数据采集、状态监测、故障检测和检测维护等功能。

网络化虚拟仪器构建中首先考虑网络化测控系统的需要，合理安排功能分布，灵活有效的部署网络应用。网络化虚拟仪器不光继承了虚拟仪器的优点，而且充分利用了网络的强大优势，使得系统更加灵活、更加有效的利用资源、更加开放^[46]。

网络化虚拟仪器软件主要由 4 部分组成，如图 4.5 所示。

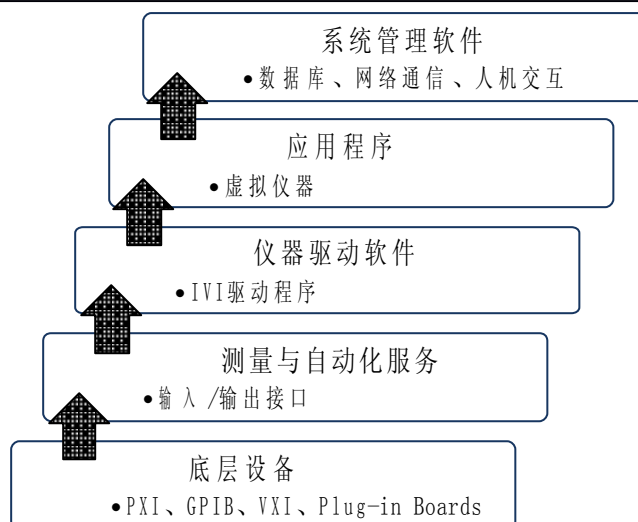


图 4.5 网络化虚拟仪器的软件结构

Fig 4.5 Software structure of networked virtual instrument

- (1) 系统管理软件：主要负责数据库、网络通信、测试结果、人机交互等任务。
- (2) 应用程序：通过虚拟仪器软件构建测试应用程序，进行数据处理分析任务。
- (3) 仪器驱动程序：软件与硬件连接的纽带和桥梁。
- (4) 测量与自动化服务：提供输入/输出接口服务。

实现以上结构的关键是实现“网络就是仪器”的网络连接部分。此外，开发过程中还应该遵循虚拟仪器软件开发标准：虚拟仪器的软件构架标准，使得不管虚拟仪器使用的计算机或者操作系统是什么，最终编写的应用程序都是可移植的，并且软件模块具有通用性^[26]。

4.4.4 虚拟仪器网络化构建

实现网络化虚拟仪器首先要将虚拟测试系统进行功能分解和模块划分，即系统构成组件化。每个相互独立的组件不仅具有数据发送和接受、信号处理与分析等功能，而且还能实现多个组件协同工作。常用的组件包括：信号采集与预处理组件、信号处理分析组件、通信组件、存储组件、显示组件、控制组件等，这些组件通过网络进行合理、有效的组合，共同构建网络化虚拟仪器系统。根据客户端和服务器的不同，目前有基于 C/S 模式和 B/S 模式两种网络化虚拟仪器。在构建一个复杂的网络化测试系统时，要灵活地运用这两种模式。根据需要选取一种或两种来共同完成测试任务。

1) 基于 C/S 模式的网络化虚拟仪器

网络化测控系统中经常采用 C/S 模式的网络架构，这种模式技术较为成熟。用户安

装必要的客户端，借助网络通信技术，实现对虚拟仪器测试系统的远程网络化应用。

在测控系统网络应用环境下，数据采集系统将采集数据传递为现场计算机(下位机)，并作为测控服务器将数据再传递给网络中的其客户端计算机(上位机)。客户端和服务端之间可以互换角色，共同设备的远程测控与处理任务。C/S 模式的网络化虚拟仪器组成如图 4.6 所示。

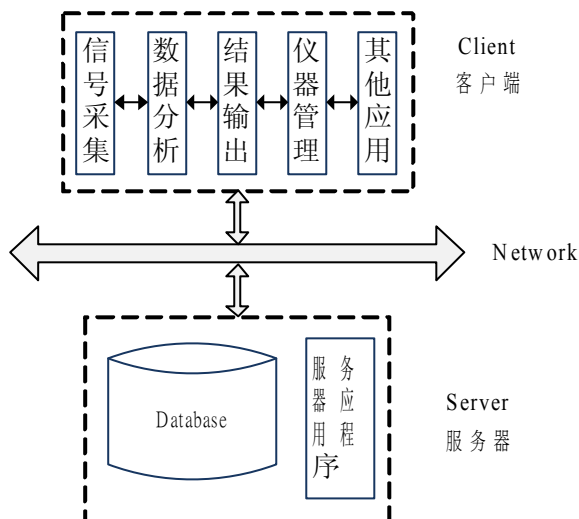


图 4.6 基于 C/S 模式的网络化虚拟仪器

Fig 4.6 Networked virtual instrument based C/S mode

采用 C/S 模式的网络化虚拟仪器测控系统具有跨地域、数据传输速度快、数据完整性及安全性高等优点，但因需要在每台客户端和服务端上安装软件使投入成本升高，也使得开发性、扩展性、可维护性降低。

2) 基于 B/S 模式的网络化虚拟仪器

基于 B/S 模式是网络化测控主要的发展趋势，而 B/S 模式的网络化虚拟仪器无须开发繁杂的客户端软件，易于开始部署系统应用功能。基于 B/S 的网络化虚拟仪器如图 4.7 所示。客户端计算机通过网络浏览器向远程虚拟仪器服务器发出请求，服务器再将虚拟仪器应用程序返还给客户端，即可在浏览器中使用虚拟仪器。

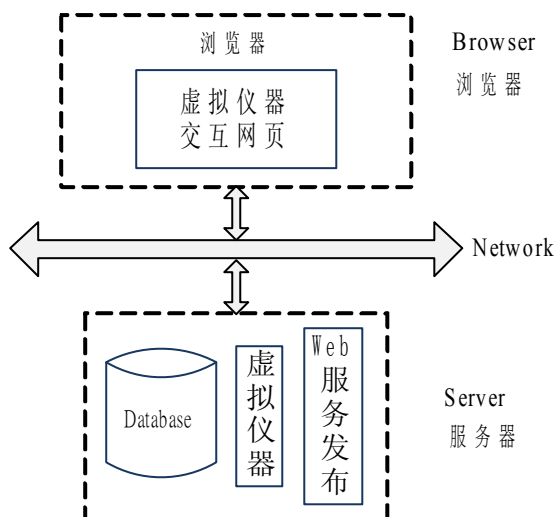


图 4.7 基于 B/S 的网络化虚拟仪器

Fig 4.7 Networked virtual instrument based C/S mode

组建基于 B/S 模式的网络化虚拟仪器主要方式是依靠服务器完成虚拟仪器的测试与数据处理功能，而借助浏览器实现与虚拟仪器测控系统的人机交互与系统应用。根据测控任务的复杂程度和测试要求，合理安排任务的分配。系统的主要工作由服务器的虚拟仪器环境实现，使得网络化虚拟仪器布置和维护简便、成本低廉、网络界面友好、信息化集成性优秀。

越来越多的网络化新技术用于实现基于 B/S 的网络化虚拟仪器，如 ASP.NET、CGI、ASP、ActiveX、Java 等。

4.5 本章小结

本章介绍了数控机床远程监测与故障诊断测控系统中涉及的自动化技术，对数据采集技术、传感器技术、信号分析处理技术及虚拟仪器技术进行了详细的论述和应用分析，特别是基于虚拟仪器的数据采集及分析技术，这些都是实现远程监测与故障诊断系统的关键技术。

5 智能故障诊断系统研究

故障诊断是利用各种检查和测试方法，了解和掌握系统在运行过程的状态和对异常情况做出判断，从而发现故障、分析原因、定位、记录信息等，并对发展趋势进行预测，最后给出故障解决方案，排除隔离故障。

故障诊断的任务包括：故障检测、识别、定位、恢复、评价及预测等。其中：故障检测是与测试系统通过信号获取、处理和分析，判断设备是否出现异常及故障；故障识别则是在检测出异常或故障后，分析故障原因及类型；故障定位是结合前两步，综合分析故障机理和数据信息，查找出故障产生的位置；故障恢复依据系统的容错控制及决策机制，恢复系统正常状态；故障评价和预测是根据相关故障信息进行过程记录、数据统计、案例分析等，从而归纳总结出设备的故障产生规律并进行故障预测。

常有的故障诊断方式有功能诊断、运行诊断、定期诊断、连续诊断、直接诊断、间接诊断、机器自检、在线诊断、离线诊断等多种诊断方式，最终目的是预防和控制设备发生故障，保证安全、有效的工作，远程高效的完成维护任务。

5.1 引言

如今，数控机床自动化程度越来越高，涉及技术领域众多，结构日趋复杂，在日常工作生产中，可能会出现各种积累性和突发性故障，影响安全、有效地生产，因此如何及时发现故障、预测故障并做出决策控制是保证设备安全、高效、可靠地运行方面重要研究和解决的问题。

由于设备故障出现的随机性、故障信息复杂性、故障原因模糊性和不确定性，使得无法通过传统的故障诊断系统或方法解决多因素、多表征的故障信息。因此结合现代测控技术、网络技术、智能仪器仪表、人工智能技术的智能故障诊断系统得到了发展，其特点主要体现在专家知识和人工智能在故障诊断过程中的应用。智能故障诊断模拟人类专家的思维对信息认识和分析，具有自动采集故障信息进行实时诊断和自主学习的能力，对故障做出正确地识别和决策控制。

数控机床智能故障诊断系统的主要目标如下：

- (1) 智能监测工作状态，合理安排生产任务，高效利用设备。对工作状态进行超前

预测，跟踪设备发展趋势，提出合理维护计划；

(2) 在设备发生故障前后，根据故障表现形式、征兆信息和数据采集信号，能够快速找出故障原因、确定发生位置、提出维修方案、完善信息跟踪；

(3) 智能、自动对故障进行隔离、削弱、切换、补偿、采用容错机制等方案，实现故障发生后快速处置，防止故障进一步恶化；

(4) 对于复杂难以辨识的故障需要进行专家系统协作诊断，需要具有信息化融合能力。结合网络化测控系统、网络化虚拟仪器、自动检测技术联合进行智能化故障诊断。

5.2 智能故障诊断系统构成

5.2.1 结构与原理

智能故障诊断系统的基本结构如图 5.1 所示

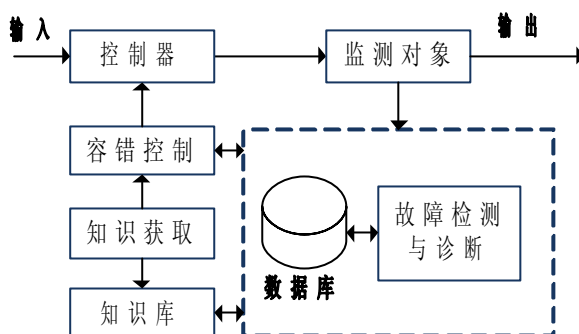


图 5.1 智能故障诊断基本结构

Fig 5.1 The basic structure of intelligent fault diagnosis

该系统主要分为故障检测与诊断单元和故障容错控制单元两部分

1) 故障检测与诊断单元

这部分主要通过数据采集系统获取设备运行信息数据，从中分析并获取故障特征，并对故障原因、类型、发生部位、涉及范围、发展趋势等做出有效的判断，主要功能包括故障信息获取、查找故障原因、确定故障位置、评定故障级别、预测发展趋势、决策与控制。具体内容如下：

(1) 故障检测与诊断方法。故障检测是容错控制的基础，而智能故障诊断则是关键技术。随着科学技术的不断进步，已经发展出网络化、人工智能、神经网络、信息融合等形式的故障诊断新技术，例如基于信号检测、参数估计、数学模型、知识、模糊理论、

感知行为、实例、神经网络的故障检测与诊断方法，这些技术和方法还在进一步发展，能够更好的提供快速准确的诊断服务。

(2) 信息机制。故障诊断过程可以看作是一个模式识别过程^[47]。系统在故障识别故障中通过不断完善的信息来降低识别过程中的不确定性。信息来源主要由故障模式类别属性构成的信息源和故障。样本特征属性构成的信息源。

(3) 自学习技术。故障诊断智能化的水平与系统的知识水平有着直接关系，通过自学习技术系统能够不断地获取新的信息、知识、方法，进一步完善系统的诊断能力。

自学习的关键技术包括知识获取技术、知识表示方法、规则更新方法以及学习策略四部分：其中知识获取可以从文献、经验中直接获取或交互式从技术人员、专家中获取知识；知识表示也称为信息推理，即根据故障信息进行深浅知识的关系演绎和挖掘；规则更新是为了适应不断增加的知识，进行的规则增加、改进等；学习策略主要有简单、交互和独立学习三种方式，综合使用这些方式不断增加系统知识量。

2) 故障容错控制单元

容错控制的基本思想是利用系统的冗余资源来实现故障容错^[48]。当系统设备发生故障时，通过故障检测和智能诊断，依靠系统的软硬件重构、降低系统性能、故障补偿、缺陷修复等手段，保证设备继续安全、可靠运转。

5.2.2 构成方法

构建智能故障诊断系统可以通过以下三步完成,如图 5.2 所示。



图 5.2 智能故障诊断系统构建流程

Fig 5.2 Construction process of intelligent fault diagnosis system

(1) 根据系统需求，确定设计目标。系统的目的主要从成本、性能、复杂度、扩展性、可靠性等方面考虑，根据系统实际情况、诊断对象、知识库、推理方式、容错与控制等要求确定系统构建方案。

(2) 构建系统的功能单元。分析系统环境状况、设备信息、故障类型等，确定故障处理层次方案，根据方案完成知识库、诊断推理机、事实库、规则库等功能模块。

(3) 对系统进行评价、完善。根据第一步的需求分析和构建目标对第二步完成的系统进行评估，评估内容包括是否满足设计要求、实际使用情况、可靠性等方面，并重复

第二步进行系统完善。

5.2.3 评价指标

评价是检验智能故障诊断系统的有效标准，主要包括下列方面：

(1) 故障检测性能。评定系统检测性能包含故障检测率、检测灵敏度、检测及时性、误检误报率、稳定性、抗干扰能力等多方面。

(2) 故障诊断性能。评定指标主要有故障识别能力、故障分辨能力、故障识别能力、分析处理能力、准确性、有效性、可信度等等。

(3) 故障处置能力。包括故障隔离能力、恢复能力、补偿能力、抑制能力、时间及时性等。

5.3 智能故障诊断实现方法

5.3.1 故障信号检测

故障信号的检测依靠数据采集系统采集到的原始信号或预处理后的信号，主要有以下几种方法：

- (1) 特征分析：主要完成时域、频域、幅值域等数值分析。
- (2) 标准对比：将采集的信号与标准只进行对比，查找异常。
- (3) 参数估计：主要运用统计方法进行诊断，如极大似然法、最小二乘法等^[49]。
- (4) 表决法：通过多个检测系统的功能应用，通过表决来检测和判断故障。
- (5) 声学法：有噪声检测、超声波检测、激振测试等
- (6) 视觉法：通过机器视觉检测设备与正常状态的区别。
- (7) 温度法：根据温度变化进行故障检测，此方法使用广泛，技术完善。
- (8) 电气设备信号：根据电气设备、变送器、PLC 等设备自有信号判断故障。
- (9) 人工智能：计算机与人工智能结合进行故障诊断、分析。

(10) 其他：网络化故障诊断、虚拟仪器、集成、信息融合、智能体、神经网络专家系统等。

5.3.2 故障特征识别

5.3.2.1 故障特征识别过程

故障特征识别过程可分四步进行：信号检测，特征提取，状态识别，维修决策。如图 5.3 所示。

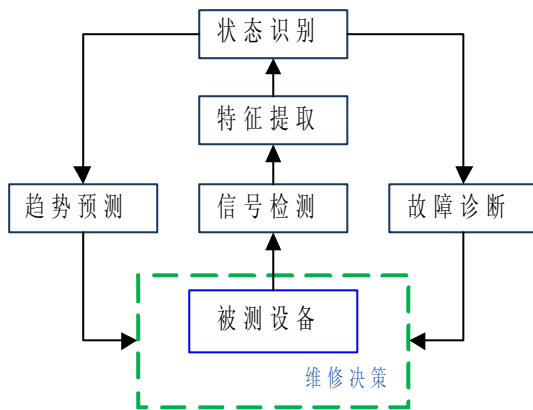


图 5.3 设备故障识别过程

Fig 5.3 The process of fault identification

1) 信号检测

特征信号是与设备紧密相关，能够表现其运行状态，因此信号检测是故障识别的重要基础。根据不同被测设备选择最能表达其工作状态的信号类型，然后确定检测方式、采集设备、布置位置等；

2) 特征提取

检测设备获取的信号一般无法有效表达特定信息，需要运用合适的信号处理技术、特征识别理论、实验验证等进行深加工，从而正确提取故障特征^[50,51,52]。例如对于振动信号可以采用时域分析、频域分析或时频变换分析，并从中得到有效信息；

3) 状态识别

获得设备特征信息后，根据设定的参数和故障识别内容进行比对，以确定特征信息表示的工作状态。比对标准可以是正常工作时的正常数据参数，也可是根据故障理论设定的故障特征、数值、历史数据等。通过状态识别，可以确定故障原因、位置、程度等数据，为维修决策提供参考；

4) 维修决策

根据状态识别提供的故障信息，确定合理有效的故障处置方案，达到对设备故障消除、补偿、隔离、稳定等目的，保证其安全、可靠、高效地工作。

5.3.2.2 故障特征识别方法

随着各学科交叉运用的增多，故障特征识别的方法也是种类繁多各具优势，目前有以下识别方法。

1) 基于故障机理的识别方法

故障机理是指故障发生与发展的过程和原理。故障机理依设备的种类、使用环境、工作条件而不同。但在多数情况下，故障机理常以磨损、疲劳、断裂、腐蚀、老化等形式表现出来^[53]。

2) 基于信号处理及特征提取的识别方法

这种方法是运用最为广泛的方法，通过安装配置不同的数据采集设备、传感器、分析处理程序等，可以快速准确的进行特征提取，是自动检测技术的基础。

3) 基于模糊理论的识别方法

该方法可以把描述设备状态的模糊信息与故障相联系，根据征兆空间与故障状态空间的映射关系查找故障存在的可能性。

4) 基于专家系统的识别方法

专家系统能够模拟人类在判断故障方面的逻辑思维，通过知识库、规则库、推理机完成复杂的故障识别，还具有自学习、自改进完善的能力。

5) 基于数学模型的识别方法

这样方法是采用现代控制理论中的知识，以模型为核心，通过对比理论输出与实际输出的差异来提取特征。

6) 基于故障模式的识别方法

利用计算机模拟人的思维过程，根据物体正常状态和故障状态的历史数据的特征量，对其进行分析、描述、识别和判断。

7) 基于神经网络的识别方法

神经网络将系统中可利用的部件、计算机、功能等模拟人脑结构建立的分布式并行信息处理模型，具有容错、联想、推断、记忆、自适应、自学习和并行运算的优点。

8. 基于小波变换的识别方法

小波分析使用傅里叶变换的局部化方法，进行时空序列分析，因此具有良好的时频局部化特性，能够很好的处理时变信号^[54]。

9) 基于组合思维的识别方法

这种方式是将逻辑思维、经验思维和创造思维组合在一起进行逐层故障分析诊断。

10) 基于案例的识别方法

基于案例的识别就是利用历史案例经验，从中分析、对比故障特征的相似度，从而进行故障识别。

5.3.3 故障维修决策

故障维修决策是在故障信号检测、故障特征识别的基础上，根据设备运行要求，确定维修、维护方案与决策。决策类型有确定型、随机型和不确定型决策，最后实施维修、维护任务。

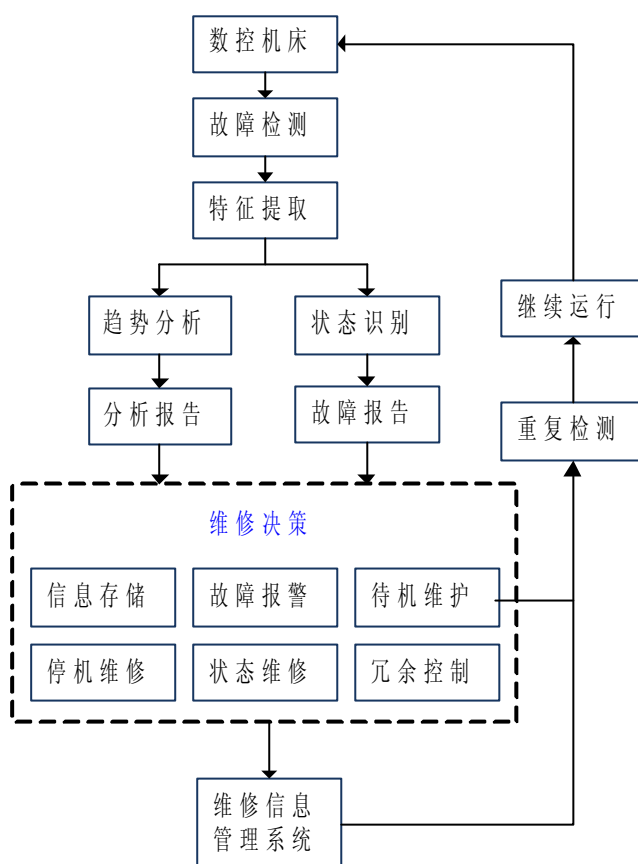


图 5.4 故障维修决策模型

Fig 5.4 The model of failure maintenance decision

目前，保证设备正常运行的维修方式主要有预防性维修和修复性维修：

(1) 预防性维修（即计划性维修）是指通过事先计划好并系统地进行检查、测试以及其他防止故障过早发生的手段，能使设备保持在规定状态的各种维修活动，其中包括润滑、调整、检测、更换等。预防性维修是以可靠性为中心的一种维修方法。特别是对于发生故障就会危及安全。或发生故障后不易被觉察的部分，通常都采用预防性维修^[55]。

(2) 修复性维修是指设备发生了故障而能使其恢复到规定功能状态所采取的各种维修活动。对于可修复故障。可以通过故障隔离、系统重构、状态反馈、部件冗余、修理故障件等来实现；对于不可修复故障可以通过大修或更换零部件来排除^[56]。

5.3.4 故障容错控制

容错控制的基本流程为故障检测、故障分析诊断和容错控制。故障检测是实现容错控制的前提条件，需要获得足够多的故障信息；故障分析诊断则是根据故障检测获取的数据分析、判断、定位故障；最后根据前两者的信息综合判断，采用合理的容错控制策略，将故障隔离、削弱、替代或消除。如图 5.5 所示。

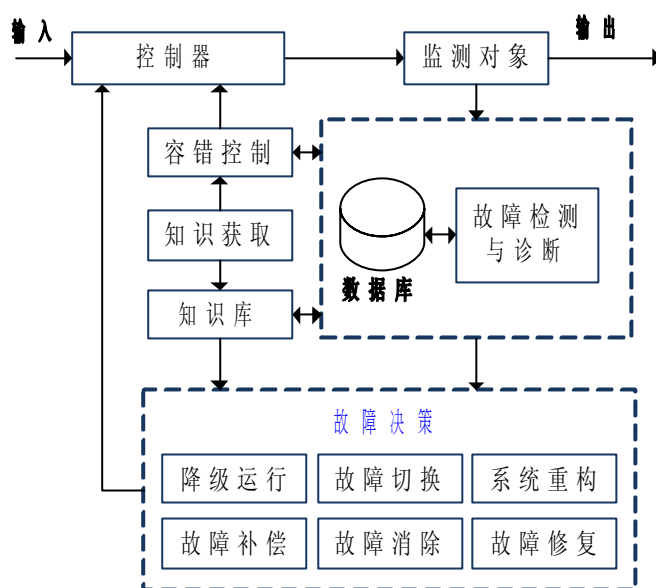


图 5.5 故障容错控制过程图

Fig 5.5 The process of fault-tolerant control

目前容错控制的构成有被动和主动两种途径。被动容错控制是以系统的稳定性和完整性为主要目标，其构成思想是采用适当的固定控制器在保证正常工作配置需求外，还具有当控制器、传感器等部件失效时正常工作的能力；主动智能容错控制是以同时保证系统稳定性和性能良好为目标，其构成思想是采用控制器的参数重配置和结构重构保证设备在故障发生后对故障的容错能力。

目前容错控制方法主要有结构冗余容错控制、功能冗余容错控制、重构容错控制、鲁棒容错控制、智能体容错控制、智能结构容错控制。具体内容如下：

1) 结构冗余容错控制

结构冗余就是利用结构本身的冗余性来实现故障容错，也可理解为硬件冗余^[57]。即

利用本身对余、备用的单元部件，当故障发生时进行硬件替代，以保证设备正常运行。这种结构冗余构建的方式多样，有工作冗余性质的并联冗余、混合冗余、表决冗余以及非工作冗余性质的冷备用、热备用和暖备用。

2) 功能冗余容错控制

系统构建可建立多个重复性功能模块，当个别模块发生故障时可进行故障替代。功能冗余主要有通过分析各功能模块的内在关系实现容错的解析冗余和备份系统参数的参数冗余两种形式。

3) 重构容错控制

重构就是在故障发生后将故障模块或部件进行隔离，剩余的部分进行重新组建新的系统，实现系统硬件和功能的重构。

4) 鲁棒容错控制

因为故障诊断系统中的工作状况变动、外部干扰等原因，无法达到精确建模，鲁棒容错就是基本此种原因设计一种控制器，使其具有对不确定性的控制能力。

5) 智能体容错控制

根据智能技术的要求，具有感知、自主活动、自适应、自诊断、自消除能力的容错控制。

6) 智能结构容错控制

依靠智能结构本身具有的感知能力，如压力、温度、应力、应变等类似于人体结构的系统，具有对故障进行自分析、自诊断、自学习、自消除等能力。

5.4 专家系统故障诊断技术

5.4.1 专家系统

专家系统是计算机与人工智能技术共同构建的程序系统，包含有领域内大量的专业知识和经验，在进行故障诊断时，通过推理机和规则库对存储的知识进行检索，从而找出问题解决的方案。其重点在于运用机器思维，关键技术在于知识的获取、表示、存储和推理。

专家系统在故障诊断上具有以下优势：

(1) 知识广泛。专家系统可以通过机械式、传授式、反馈修正式、机器学习等知识获取机制不断扩大知识广度。

(2) 高效性。面对大量繁杂的知识和多变的推理，专家系统借助计算机可以高效、及时地完成故障诊断任务。

(3) 智能性。专家系统集合了大量的知识，通过建立有效的程序可以智能化完成诊断工作。

(4) 易维护。专家系统中的知识库、规则库、推理机直接具有相当独立性，可以分块、分层地进行维护工作。

(5) 互动性。通过启发式问答、透明式问题解释，有效地完成与用户地诊断服务。

(6) 信息融合性。专家系统可以与分布式系统、信息网络、测控网络等进行集成，实现信息融合的功能。

5.4.2 系统组成

专家系统一般由数据库、推理机、知识获取、解释模块和人机交互界面等部分组成。如图 5.6 所示。

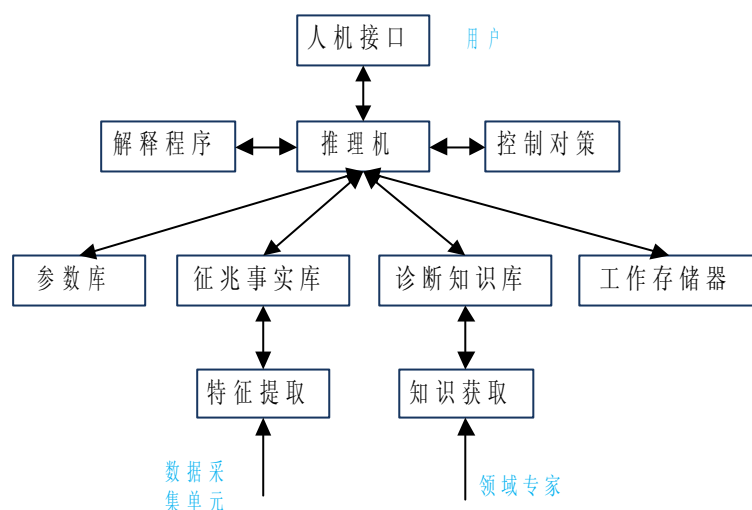


图 5.6 专家系统组成结构

Fig 5.6 The structure of expert system

(1) 数据库。数据库包括诊断知识库、征兆事实库、参数库、规则库等组成，用来存放故障检测数据、专家知识，故障征兆、各设备与子系统参数、历史数据、任务信息、决策控制方法等数据。

(2) 推理机。推理机是专家系统完成整个诊断任务的关键，通过检索数据库，根据相应的推理诊断规则及策略进行故障推理，最终确定故障原因、位置、机理、决策建议等信息。

(3) 知识获取。知识获取主要完成内部及外部知识输入专家系统的工作。可以通过机械式、传授式、反馈修正式、机器学习等方式获取知识。

(4) 解释模块。用以回答输入信息并提供问题的解答，起到用户与推理机之间桥梁的作用，是实现用户交互的主要机构。

(5) 人机界面和用户接口。用户只有通过良好人机界面才能直观地与专家系统进行故障诊断任务。用户接口可提供不同软件、系统、网络地连接通道，实现信息化融合。

5.4.3 知识获取

专家知识获取过程就是专业知识从知识源到数据库的转移过程^[58]。专家系统的诊断水平体现在知识的拥有量上，要不断地输入和学习知识来改进自身性能，而知识获取正是这一关键重点。知识的获取机制有手工、半自动、自动和智能化等方法，常见的有以下几种：

(1) 机械式知识获取机制。这种方法是手工完成专家知识地录入，根据数据类型和格式要求机械式输入到知识库中。如图 5.7 a；

(2) 传授式知识获取机制。这种方法通过知识工程师从书籍、文献以及领域专家的知识传授进行信息获取，并进行格式处理，以计算机可识别的信息类型输入知识库。同样属于手工类型。如图 5.7 b；

(3) 反馈修正式知识获取机制。由于知识量不断地增加和改变，实际执行情况有所差别，将这些差别信息反馈给知识库进行知识完善、更新、修正等。这种方式在传授式知识获取机制基础上加上反馈环节，属于半自动式。如图 5.7 c；

(4) 机器学习知识获取机制。这种机制是人工智能的应用范畴，具备其自学习、自适应、自补偿等优势，属于自动且智能化方式。如图 5.7 d。

5.4.4 知识表示

知识表示就是把从外部或内部获得的形式不一的原始知识或数据，利用人工智能语言建立专家系统与知识的关联关系，使信息能够存储到计算机中，以便被查询、搜索、提取、表达。

每个领域都具有不同的领域特点，不同的知识层面、不同的表达方式、不同的工作形势，无法统一使用相同知识表达方法。目前有规则、框架、网络、面向对象等知识表示方法^[59]，根据领域的特点进行选择，但必须满足可用性、可读性、完善性、确定性和

可扩充性的要求，只有按照专家系统知识表达的要求进行知识表达，才能在故障诊断上有效地发挥专家系统的优势。才能够有效、直观表达知识。

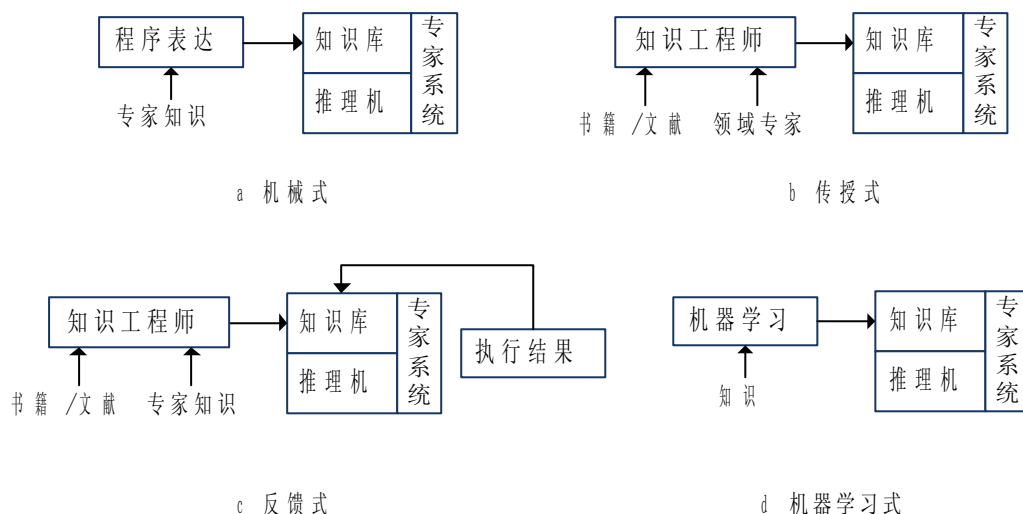


图 5.7 知识获取机制

Fig 5.7 Knowledge acquisition mechanism of expert system

5.4.5 推理机控制策略

推理机是专家系统中实现基于知识推理的主要功能模块，包括推理和控制部分，直接影响系统效率和功能。推理机根据故障诊断任务要求或用户输入，有效地选择、搜索知识数据库并得出完善的问题解答。需要考虑推理方法和控制策略这两个问题。

1) 推理方法

由于知识的不完善、事实不充分、规则不完整等因素，故障诊断专家系统的推理为复杂的不精确推理。主要有以下方法：

(1) 基于规则表示知识的推理。依靠专家知识实现快速推理，受专家知识的不完善性影响较重。

(2) 基于语义网络的推理。也称为故障树分析方法，这样结构具有存储数据量大、易于修改和扩展、故障现象与原因关系明确等优点，但建树工作量大，易于构建小型专家系统。

(3) 基于模糊集的推理。利用模糊关系矩阵建立关系矩阵，根据征兆空间与故障状态空间的映射关系查找故障存在的可能性。

(4) 基于深层知识的推理。该方法是从原理上对故障症状与成因进行分析，依靠完备的知识集，摆脱了对经验专家的依赖性^[60]；

2) 推理策略

目前常用的有数据驱动型、目标驱动型、混合型推理策略

(1) 数据驱动推理策略。数据驱动推理又称为正向推理。即从已知数据信息出发，让规则的前提与数据库匹配，推出问题结论^[61]。

(2) 目标驱动推理策略。目标驱动控制又称反向推理。由目标出发，为验证目标的成立而寻找有用的证据的推理方式^[62]。即选定目标，从知识库中查找与之匹配的规则集并执行递归计算，最后得出结论。

(3) 混合控制策略。综合上述两种方式进行地推理。即利用数据驱动控制策略选择某个目标，利用目标驱动控制策略求解该目标，解决了盲目选择目标及推理的缺点。

5.5 基于 ActiveX 的故障诊断专家系统

5.5.1 ActiveX 技术概述

ActiveX 是 Microsoft 提出的一组使用 COM (Component Object Model, 附件对象模型)，使得软件部件在网络环境中进行交互的技术集^[63]。它与具体的编程语言无关，是跨越语言的操作系统标准，各种应用程序通过已定义的对象间存取属性和方法，可以在不同平台上调用其他程序对象。使用 ActiveX 插件，简便的在 Web 页或客户端中插入多媒体效果、交互式对象以及复杂程序等等。

ActiveX 技术包括 ActiveX 控件和 ActiveX 包容器，它们通过 COM 接口进行通信，ActiveX 可以在不同的包容器中运行，具有普遍的适应性。

5.5.2 构建数控机床专家系统

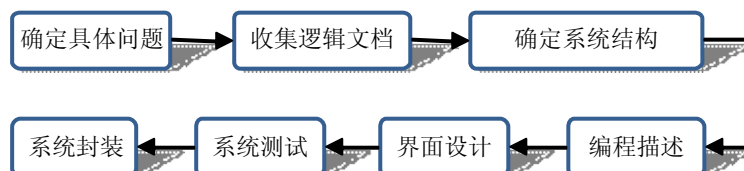


图 5.8 专家系统构建过程

Fig5.8 Construction process of expert system

依靠 ActiveX 技术创建一个智能故障诊断专家系统基本步骤如图 5.8 所示。

1) 确定系统将要解决的具体问题

精确的描述系统将要开展的工作对于后期系统扩展有很大的优势，系统应该的目标是解决具体问题或是提供具体范围内的建议，任务越具体构建系统越容易。例如，对于数控系统的故障诊断，对于整个数控设备的故障诊断通常是比较复杂的系统，所以要将问题细化，这样对于整个系统来讲就是易于定义和精确的问题定义。在系统创建中，解决所选问题需要逻辑合理和准确的步骤，问题中涉及直觉、感情、随机因素时，系统将无法准确表达。

2) 为系统收集逻辑文档

专家系统的逻辑获取可以通过系统设计者（本地专家）或其他方式获得，每一步解决问题的文档越多，越容易建造系统。如果所有的逻辑文档都已确定，那么主要工作仅仅是将逻辑转换到 ActiveX 系统中。

3) 确定系统结构

在 ActiveX 中有很多方式构建系统，并且经常是同一问题能通过不同方式得到解决，。结构要求选择技术问题以及解决方案，并将逻辑规则划分成可维护及可重用的块或其他参数。

4) 使用 ActiveX 描述系统逻辑

一旦“问题-解决”的逻辑结构确定，它必须转换成相应规则形式。

5) 设计终端用户界面

当设计系统时，使用者更趋向于简单、舒适、易于调整的界面。界面设计应贯穿与整个系统的构建过程中，以便不断更新、完善和调试。

6) 系统测试

一个完整的系统需要经过专家、使用者的多次测试，以确定能够提供准确的结果。

7) 系统封装

系统的有效性测试通过后，就可以将其移植到服务器并提供给最终用户使用。

5.5.2 功能模块与结构分析

数控机床故障诊断专家系统按照数控机床的结构可以分为主传动子系统、进给运动子系统、数控系统与电气子系统、液压与气压子系统、刀具子系统、辅助系统等，也可按照监测信号的种类分为温度、振动、电气控制、开关量等诊断子系统。系统结构模型如图 5.9 所示。

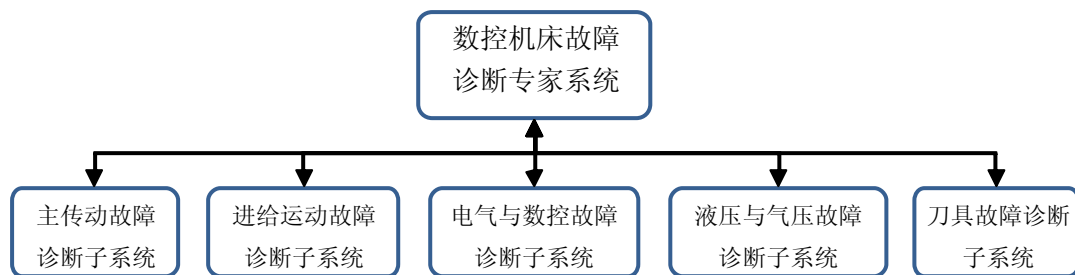


图 5.9 故障诊断专家系统结构

Fig 5.9 Structural model of fault diagnosis expert system

在本系统中，主程序通过激发事件实现与各个子系统进行交互，而专家系统具体功能的实现，如知识库、推理机、决策控制等都在各个子系统中，每个子系统都采用 ActiveX 技术做成 OCX 控件，以完成主程序的调用。系统包括知识库系统、知识获取机、推理机、解释机、控制决策、中间数据库、实时数据库等几个部分组成。其总体结构如图 5.10 所示。

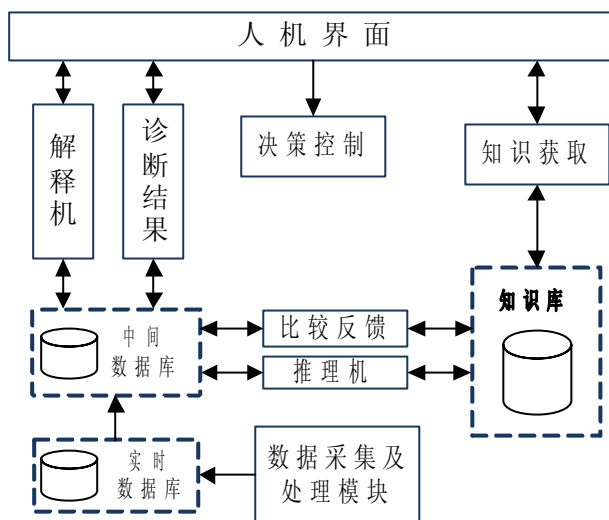


图 5.10 故障诊断专家系统总体结构

Fig 5.10 The overall structure of fault diagnosis expert

人机界面是用户同专家系统交互的平台；专家知识存放在知识库中，包括事实库和规则库；知识获取是专家系统完善知识的主要机制；数据采集及处理模块采集到的数据存放在实时数据库中，其中的数据处理模块可以对完成数据整理和发掘任务；中间数据库是一个公共数据库，各功能模块之间通过它进行数据交换、存储事实、规则、中间结果等信息；推理机根据相应机制进行推理和检索数据，完成故障诊断任务。

5.5.2 故障诊断系统实现

在本系统的开发中，专家系统与数据库的方式可以在本地完成，也可通过 ActiveX 在客户端或 Web 浏览器中实现，软件设计基于 windows7 操作系统，数据库采用 SQL Server 2008，使用 Borland C++ BuildXE 作为专家系统的开发工具。

5.5.2.1 知识库的实现

1) 故障诊断方法

根据数控机床故障信息及诊断方法的特点，系统采用框架分析法及故障树分析法。对与结构简单零件部位及故障原因明确的故障，采用框架分析法；对于关键部位及复杂故障宜采用故障树诊断分析方法。

(1) 框架分析法。

表 5.1 中信息为 SINUMERIK 840D_810D 的报警信息的框架分析法示例，它表示的故障类型简单，引起故障的原因清楚，相应的对策与控制机制明确，通常这类故障容易排除，设备在日常维护中即可解决。

表 5.1 框架结构故障分析法

Table 5.1 Framework method diagnosis analysis

报警代码	故障现象 及报警信息	类型	解释	决策与控制	示例
100 300 没有找到 XX	输入到表格中 的寻找项目	信息	没有找到搜索项 目	重新输入有效 文本	
100 301 不能建立完整 的图表	系统错误,如果 需要可以重新 引入	信息	没有足够的存储 空间可以用来生 成表格	整理存储空间	
			

(2) 故障树诊断分析法。

故障树图是一种图形化逻辑因果关系图，它根据元部件状态(基本事件)来显示系统的状态(顶事件)^[64]。一个故障树图是从上到下逐级建树并且根据事件而联系，它用图形化"模型"路径的方法，使一个系统能导致一个可预知的，不可预知的故障事件（失效），路径的交叉处的事件和状态，用标准的逻辑符号(与，或等等)表示。在故障树图中最基础的构造单元为门和事件，这些事件与在可靠性框图中有相同的意义并且门是条件^[65]。

故障树诊断分析法的因果关系清晰、形象，对导致事故的各种原因及逻辑关系能做出全面、简洁、形象地描述；可计算结构重要度，即确定各基本事件对导致事故发生的影响程度；既可进行定性分析，又可进行定量分析和系统评价。通过定性分析，确定各基本事件对事故影响的大小，从而可确定对各基本事件进行安全控制所应采取措施的优先顺序，为制定科学、合理的安全控制措施提供基本的依据。通过定量分析，依据各基本事件发生的概率，计算出顶上事件（事故）发生的概率，为实现系统的最佳安全控制目标提供一个具体量的概念，有助于其它各项指标的量化处理^[66]。

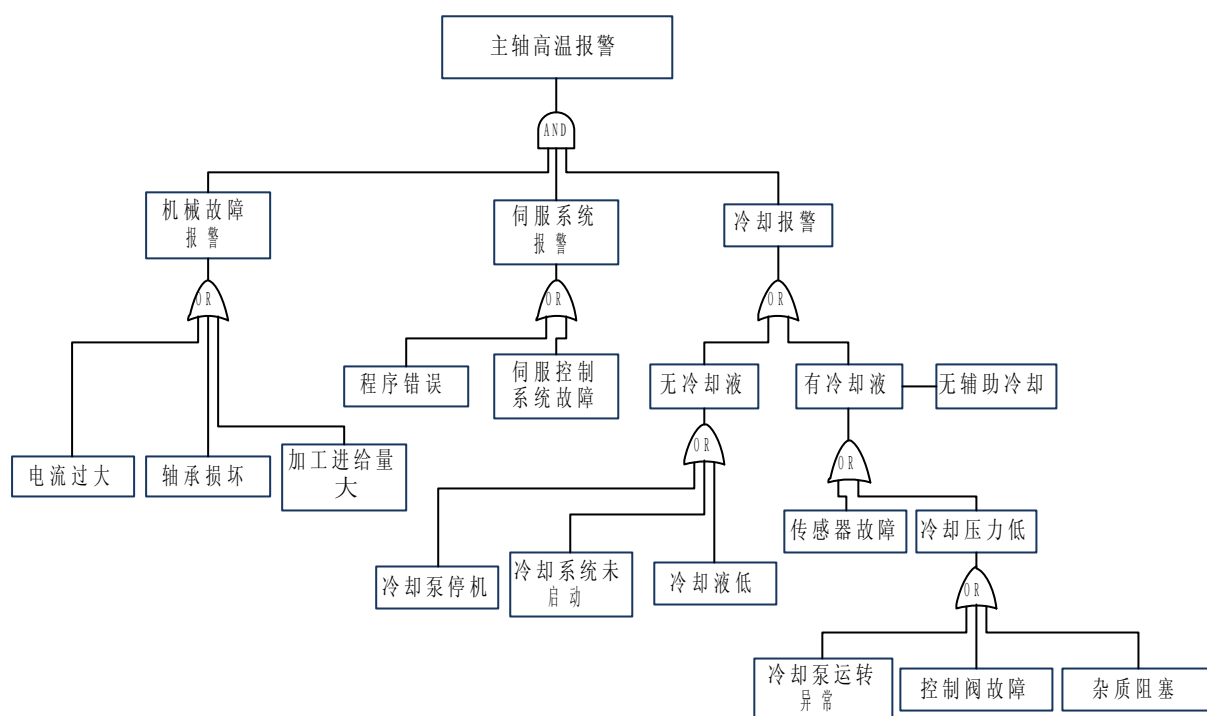


图 5.11 数控机床故障树诊断方法示例

Fig 5.11 An example of fault Tree Analysis foe CNC

如图 5.11 所示，从数控机床最坏故障现象入手进行逆向推理，编出相应的故障树，以主轴高温报警现象为顶事件，一步一步分析数控机床的原因及引起故障的部件。采用演逆向演绎推理建树的方法，由顶事件出发，一直分解到底事件为止。对于数控机床来，故障树建立是个庞大而复杂的过程，需要不断扩充及完善。

2) 知识表示

本系统采用产生式规则表示法，产生式通常用于表示具有因果关系的知识，其一般表达形式是：

If P then Q

5.1

其中，P 是产生式的前提（前件、条件、前提条件），用于表示该产生式是否可用的条件；Q 是产生式的结论或操作，成为结论（后件），用于指出当前 P 所指示的条件被满足时应该得出的结论或应该执行的操作^[62]。

3) 建立数据库

根据知识表示的需求，数据库需要存储各种故障信息及诊断规则，因此建立了以下几种数据库：

表 5.2 正常运行参数库
Table 5.2 Parameter library of normal operation

正常参数名称	代号	参数类型	所属部件	参数类型	参数值	修改日期

正常运行参数表 5.3。主要存储数控机床正常运转状态下的静态数据，再进行故障诊断推理时以此参数为基准进行数据的比对。

表 5.3 故障信息库
Table 5.3 Information library of fault

故障信息编号	故障现象与报警信息	报警代码	所属部件	类型	故障原因	解释	决策与控制	示例	日期

故障信息存储的数控机床相关故障的信息数据及决策控制意见，这也是信息量最大、用户使用最多的数据库。

表 5.4 规则库
Table 5.4 Rules library

规则代号	父故障代号	子故障代号	故障信息编号	故障原因	所属部件	决策与控制

规则库中存储了故障树中的推理规则以及上下结点，以便快速查找故障相关信息，规则库的完善也就是整个故障树的完善，这需要知识获取的功能实现。如表 5.4 所示。

5.5.2.2 推理机与决策的实现

使用 ActiveX 构建推理机及决策子组件，具有完善的功能及通用性，在整个数控机

床远程监测系统中，这些子组件可以简单的应用到各个子系统及主系统当中。

由于 ActiveX 控件需要与各系统协作，为了及时快速的与包容器程序通信并执行决策与控制，所以 ActiveX 组件的实现应包括属性和方法管理、事件机制、用户界面特性、状态永久机制。在 C++中创建 ActiveX 推理机的类库如图 5.12 所示。

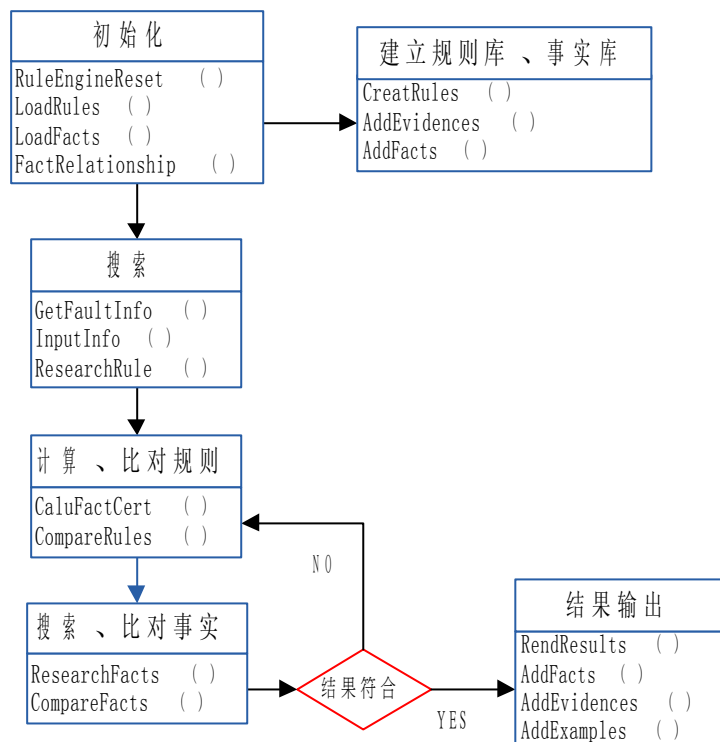


图 5.12 推理机控件类图

Fig 5.12 Class diagram of inference control

推理机启动后首先进行初始化，包括加载事实库、规则库、关系库等到 ROM 中；然后根据输入的推理或查询条件进行搜索，将搜索到的事实、规则等进行比对并计算可信度，如果结果符合条件，那么接返回结果，并且将本次搜索产生的实时、解释、样例写入知识库。

5.6 本章小结

为了能够实现智能故障诊断，需要对故障诊断系统的结构，信号的检测、识别、决策和控制技术等关键技术从理论和方法上进行了详细的研究。重点研究了故障诊断专家系统在数控机床上的应用，其中包括系统组成、知识获取、知识表示、推理机控制决策等方面进行了深入分析。着重介绍了采用 ActiveX 技术构建专家系统的方式和主要工作。

6 数控机床远程监测与故障诊断系统的实现

6.1 系统总体结构

通过对数控机床远程监测与故障诊断所涉及的网络化测控系统、数据采集系统、信号分析与处理系统、故障诊断专家系统的深入研究，设计出数控机床远程监测与故障诊断系统总体框架，如图 6.1 所示。

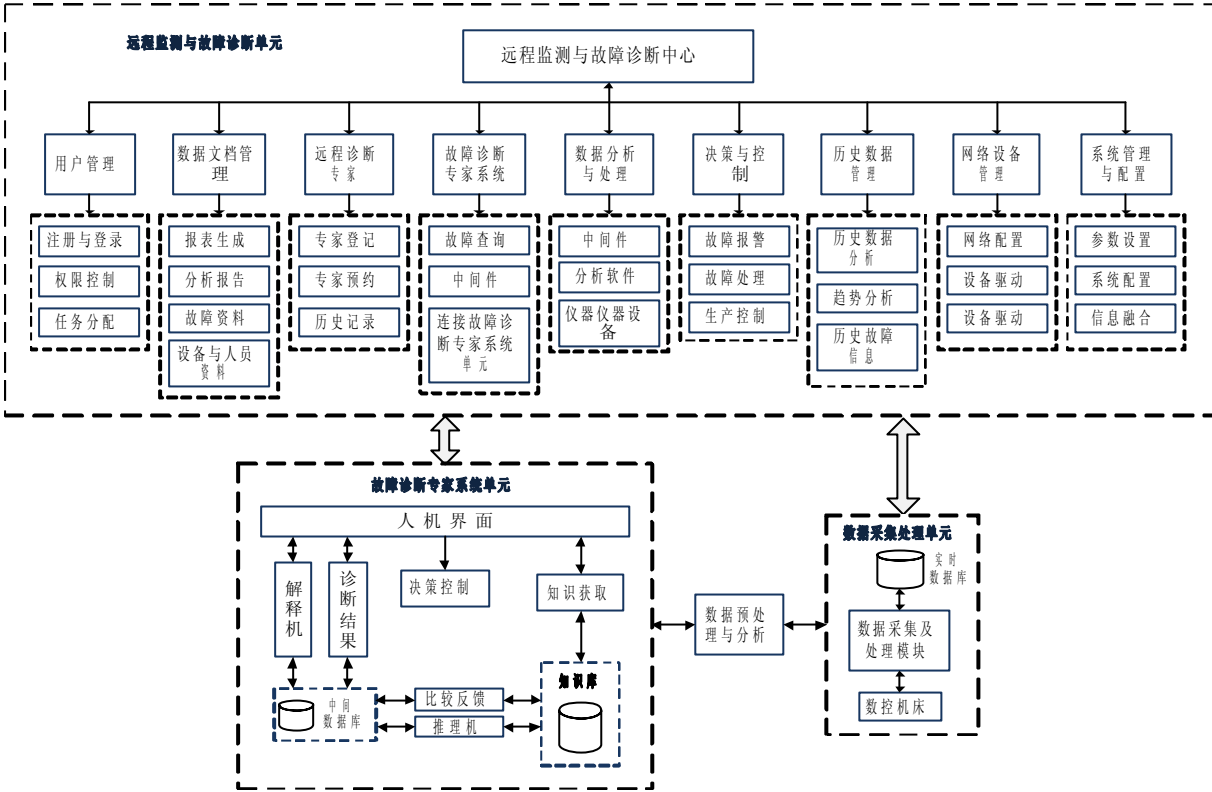


图 6.1 数控机床远程监测与故障诊断系统组成框图
Fig 6.1 The structure of CNC remote monitoring and fault diagnosis system

6.2 基于可编程自动化控制器的实时数据采集系统

6.2.1 可编程自动化控制器

PAC 的概念定义为：控制引擎的集中，涵盖 PLC 用户的多种需要，以及制造业厂商对信息的需求。可编程自动化控制器（PAC）是将最佳的 PLC，DCS 和 PC 技术融合在

一个统一的、多功能的单元上,以及 PC-based 控制中基于对象的、开放数据格式和网络连接等功能,并用于满足现代工业应用中愈来愈多的复杂要求^[67]。

在实施数控机床远程监测与故障诊断系统中,需要面对各种复杂的设备,比如典型的控制系统需要接受传感器和信号,但传统的 PLC、DSC、DAQ 并不能满足生产企业对于更灵活强大的控制功能、网络应用、设备互操作性和信息化数据融合等要求,这些类型的任务更适合与 PC 来处理,这就需要增加 PC、中间件(网关、转换器、软件)。而 PAC 系统是一种多功能控制平台,用户可以根据不同的要求和意愿构建灵活多变的系统,系统更具开放性、通用性、标准性等优势。与 PLC 依赖硬件实现功能应用不同,PAC 用于通用、软件形式的系统构建方式,其用户系统和程序无需变化即可应用于不同的 PAC 系统中,可以迅速扩展和变化系统需求。

6.2.2 数据采集系统设计

NI CompactRIO 可编程自动化控制器(PAC)是低成本可重复配置的控制与采集系统,是为需要高性能和高可靠性的应用而设计的。系统将开放式嵌入式体系结构和小尺寸、高坚固性、可热插拔的工业 I/O 模块结合在一起。CompactRIO 使用可重复配置 I/O (RIO) 现场可编程门阵列(FPGA)技术。

CompactRIO 系统由包含用户可编程 FPGA 的可重复配置机箱、热插拔 I/O 模块、用于确定性通信与处理的实时控制器以及用于快速实时与 FPGA 编程的图形化软件 LabVIEW 组成,如图 6.2 所示。



图 6.2 CompactRIO 配置示意图

Fig 6.2 Schematic diagram of CompactRIO configuration

数控机床远程监测与故障诊断系统需要采集的信号类型包括电压、电流、应力与应变、温度、数字输入、数字输出、振动、串口通信。配置列表如表 6.1。

表 6.1 CompactRIO 硬件配置表

Table 6.1 The configuration of CompactRIO harewares

测量类型	嵌入式实时控制器	机箱	电压	电流	温度
型号	NI 9022	NI 9118	NI 9201	NI 9203	NI 9213
测量类型	应变与电桥	数字输入	数字输出	加速度和声音	串口通信
型号	NI 9235	NI 9425	NI 9477	NI 9234	NI 9870

6.3 LabVIEW 与数据分析

6.3.1 LabVIEW 概述

LabVIEW 是一种图形化的编程语言，用以构建虚拟仪器平台，其包括前面板、程序框图及图标/连线板三部分，并且集成了 GPIB、VXI、RS-232C、USB 等数据采集、数据分析及数据存储功能。利用 LabVIEW 的图形化编程语言，设计者不需要写入繁多的程序，而将更多的开发时间和精力放在功能设计及分析中。

采用 LabVIEW 构建虚拟仪器能够极大的简化远程监测与故障诊断系统的工作，而且能够灵活地构建功能强大的数据采集和分析系统，当测试任务发生改变时可以及时响应、快速构建新的测试系统。

6.3.2 LabVIEW 与数据采集、处理

LabVIEW 具有完善的控制及设计模块、信号分析处理模块、数据传输及存储、报告发布等功能，方便构建灵活的监测与故障诊断系统。利用 LabVIEW 本身大量的函数和子程序库，可以快速完成数据分析及处理程序的设计任务，其包含特定的应用程序库代码，如数据采集、通用功能接口总线、串行接口仪器控制、数据分析、数据显示、数据存储、Internet 通信等。分析库包含了大量使用的函数，如信号产生、信号处理、滤波器、窗口、统计、回归、线性代数、矩阵运算等。

本系统利用 LabVIEW 构建监测信号的分析、处理、汇总、发布等功能模块，例如诊断信号的测试，如图 6.3 所示。

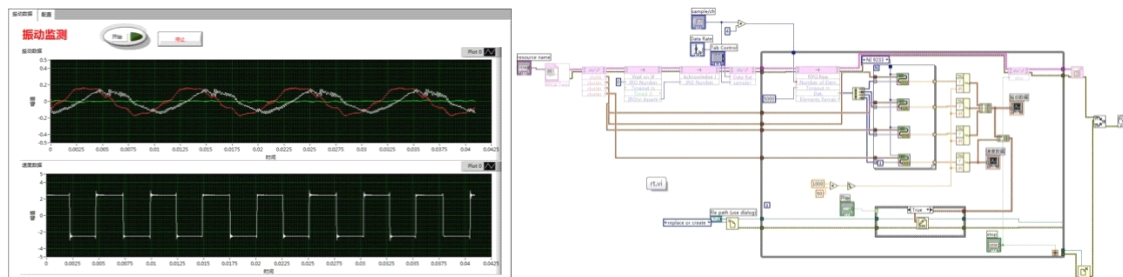


图 6.3 振动信号采集前面板及程序框图

Fig 6.3 The program of acquisition vibration data

6.4 数据记录与网络发布

6.4.1 LabVIEW 数据记录和存储

对于监测和故障诊断系统而言，数据存储是保证系统功能实现的关键基础部分。LabVIEW 中提供了多种数据存储格式，如数据库、文本文件、配置文件、二进制文件、XML 文件、TDMS 文件以及 UTF-8 编码的文件，在构建系统时应考虑不同的需求和应用混合使用多种数据存储格式，也可使用某种特定的数据存储格式。选择存储格式时应考虑以下指标：

1) 存取速度。系统中各部分对存取速度的要求各不一样，如实时采集模块需要高速存储，而历史记录或远程发布对存取速度而要求较低。因此根据功能要求选择存取速度不同的格式。

2) 可检索和维护。系统中的数据始终是在不断变化着地，有效地组织、完善、维护数据的有效性是选择存储格式的基本要求。

3) 兼容性。为实现系统的集成性和融合性，需要存储方式和格式能够适用于多种软硬件系统，以便于数据的共享和传输。

4) 可移植性。测量和采集系统的功能和测试任务不断改变和更新，那么其存储的数据也需要满足在不同系统中的移植能力。

例如，在测试测量领域中，XML 文件通常被用来传递应用程序的配置文件和参数。XML 是一种目前广泛使用的数据传输和存储的格式，本质上是一种文本文件。XML 具有自我描述性且使用标签定义文档的结构和含义，多用于基于 Internet 的信息共享，它可以独立于硬件和编程语言，因此在数据共享上具有更好的标准化、兼容性和高效率，能够轻松地交换应用系统间的测量结果。XML 条理清晰、结构简单以及检索方便，XML

本身的多层次结构能够准确的表示多种树状结构。如图 6.4 所示。

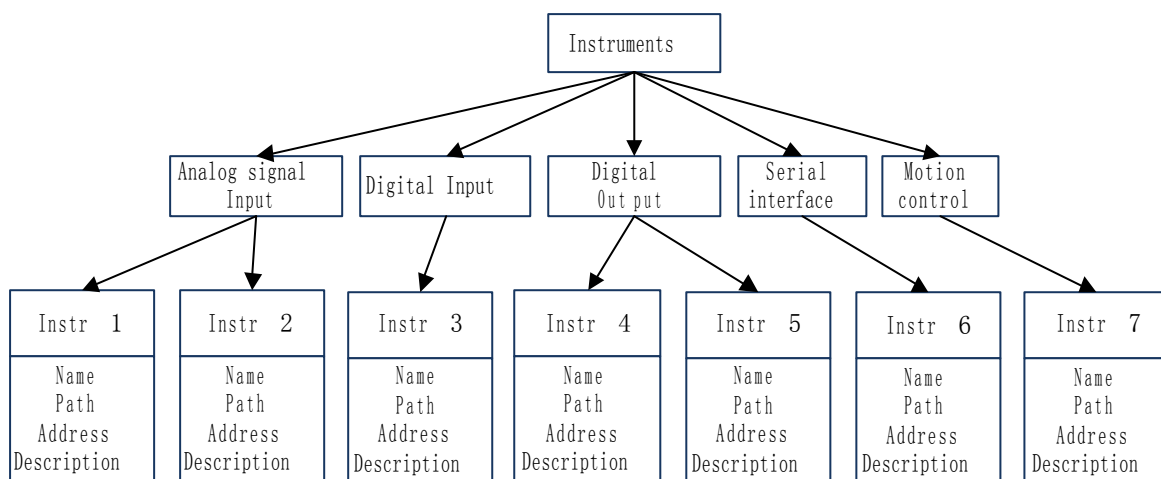


图 6.4 仪器配置列表示意图

Fig 6.4 Schematic diagram of instrument configuration list

XML 文件主要存储各种仪器的参数信息，如name(名称)、address(地址)、description(描述)。但是文件对各种仪器进行分类，根据仪器功能分为 AC Source、DC Source 等。具体描述语言如下：

```

<?xml version="1.0" encoding="utf-8" standalone="yes"?>
<instruments>
<Analog signal Input>
<instrument>
<path>
<name>Instr1</name>
<address>NI 9211</address>
<description>热电偶，24 位 delta-sigma，15 S/s，差分</description>
</path>
</instrument>
<instrument>
<path>
<name>Instr2</name>
<address>NI 9234</address>
<description>IEPE 输入，24 位，50 kS/s，同步，软件可选的 IEPE 调理，内置抗混叠</description>
</path>
</instrument>
</Analog signal Input>
<Digital Input>
<instrument>
<path>
<name>Instr3</name>
<address>NI 9425</address>

```

```

<description>24V 7us, 漏极, 12-24V</description>
</path>
</instrument>
</Digital Input>
<Digital Output>
<instrument>
<path>
<name>Instr4</name>
<address>NI 9472</address>
<description>24V 源极, 100us, 750mA 最大通道, 30V 保护, 短路保护</description>
</path>
</instrument>
<instrument>
<path>
<name>Instr5</name>
<address>NI 9472</address>
<description>24V 源极, 100us, 750mA 最大通道, 30V 保护, 短路保护</description>
</path>
</instrument>
</Digital Output>
<Serial interface>
<instrument>
<path>
<name>Instr6</name>
<address>NI 9870</address>
<description>RS232, 4 个 RS232 串口用于 CompactRIO, 每个端口上均配有 61 B UART FIFO, 8 到 28VDC 外部供电,
包括 PC-MF4-PT 电缆</description>
</path>
</instrument>
</Serial interface>
<Motion control>
<instrument>
<path>
<name>Instr7</name>
<address>NI 9505</address>
<description>H 全桥 DC 伺服驱动</description>
</path>
</instrument>
</Motion control>
</instruments>

```

6.4.2 网络通信

远程监测与故障诊断系统往往需要综合应用不同软件开发平台的功能, 才能使系统

完善, LabVIEW 具备与其他应用程序通信的功能及必要的开发工具, 主要技术有 .NET 技术应用、动态技术应用、动态数据交换、外部代码调用、库函数调用、运行外部中间件程序等实现。

DataSocket 技术基于 Microsoft 的 COM 和 ActiveX 技术, 使得软件部件在网络环境中进行交互, 它与具体的编程语言无关, 具有开发的属性和方法, 不同的应用程序可方便调用^[68]。DataSocket 是专门用于传输和发布动态数据的, 能够实现网上高速数据交换, 并对底层进行了高度封装, 开发人员只需要了解需要交换的数据就可以直接进行应用程序的开发, 而不必关心底层的实现细节, 从而简化通信程序的编写过程, 提高编程效率, 实现了高效、快速、跨机器、跨语言、跨进程的实时数据共享。

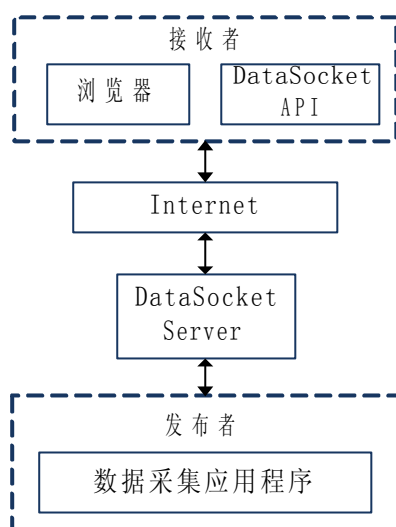


图 6.5 DataSocket 体系结构

Fig 6.5 DataSocket architecture

DataSocket 由 DataSocket API 和 DataSocket Server 两部分组成。DataSocket API 是一个和协议、编程语言、操作系统无关的应用程序接口, 能够把测量数据转化为适合在网络上传输的数据流。DataSocket Server 是一个独立部分, 可以把现场数据高速传给远端客户。用 DataSocket Server 发布数据需要 3 个部分: 发布者(publisher)、服务器(DataSocket Server)、接收者(subscriber), 三者关系如图 6.5 所示。发布者通过 DataSocket API 把数据写入 DataSocket Server, 接收者通过 DataSocket API 从 DataSocket Server 读出数据。发布者和接收者之间具有时效性, 接收者只能读到信息运行后发布者发来的数据, 此数据可以被多次读到。DataSocket Server Manager 定义了最大连接数, 最大数据对象个数, 规定了数据访问的权限, 即哪些计算机可以作为发布者, 哪些计算机可以作为接收者。这三部分可以存在于一台装置中, 但多数是分布在不同的装置中, 这样有利于改善系统性能,

提高安全度^[68]。

6.4.3 网络发布

LabVIEW 可以将前面板 (VI) 或 HTML 文件发布到浏览器中, 这样用户可以通过浏览器进行虚拟仪器的网络化应用, 在 Web 上发布 LabVIEW 程序有很多方式, 都是通过建立在发布程序计算机上的网站服务器 (Web Server)。完成相关的 Web 服务器配置、可见性设置、浏览权限管理就可实现网络发布。示例如图 6.6 所示。

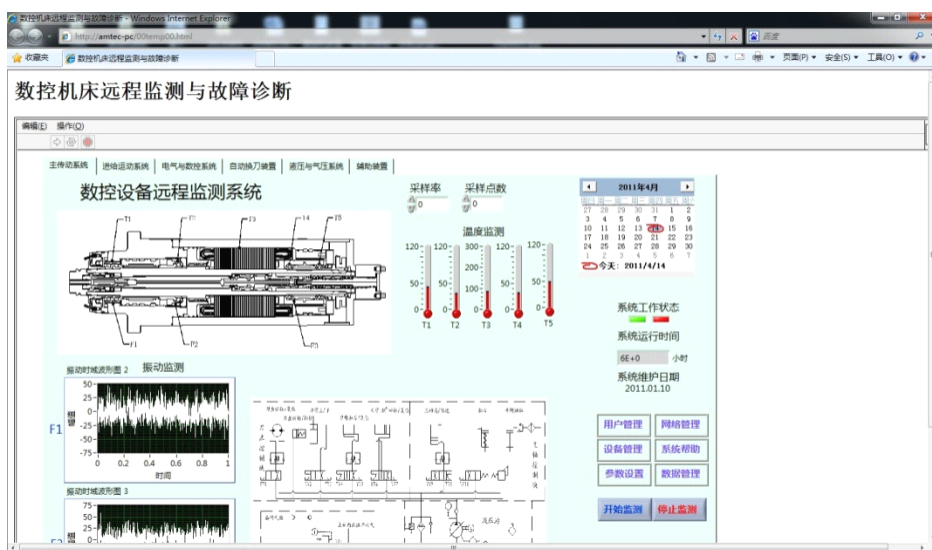


图 6.6 虚拟仪器网络应用示例

Fig 6.6 A example of VI Web Applications

6.5 远程服务中心系统设计

6.5.1 结构组成

远程监测与故障诊断中心硬件系统包括：**Web 服务器**、**数据服务器**、**应用终端**（**HMI**、**计算机**、**PDA** 等终端设备）。**数据库服务器**用于存储采集系统获取的设备状态数据、故障分析结果、历史数据和维护记录等；**Web 服务器**作为网络化监测与诊断系统的服务平台，连接网络数据库服务器并实时响应来自终端设备的应用请求，实现远程状态监测、工况分析、故障诊断和数据管理等功能。

远程监测与故障诊断中心多位于技术实力较强的企业部门或科研院所，可以提供数据分析处理、故障排查、智能诊断、专家支持等服务。当设备出现异常或故障情况时，通过 Internet 访问远程故障诊断中心，并提交一些必须的信息，远程故障诊断中心对这

些信息进行处理、分析并提出解决维修方案。在诊断中心诊断能力不足时，不仅能够与其他诊断中心进行协同诊断，并将诊断结果进行融合、对比，还可以邀请专家异地会诊，有利于提高诊断的准确性和可靠性。远程监测与故障诊断中心的结构如图 3.8 所示。

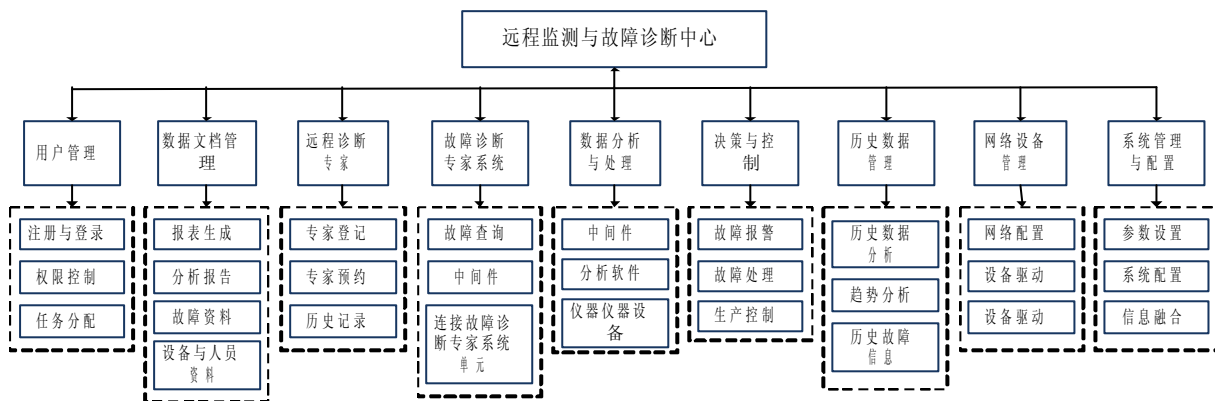


图 6.7 远程监测与故障诊断中心的系统组成

Fig 6.7 The Structure of Remote Monitoring and Fault Diagnosis System Centre

6.5.2 功能介绍

远程监测与故障诊断中心从功能上可以分为用户管理、数据文档管理、远程诊断专家、故障诊断专家系统、数据分析与处理、决策与控制、历史数据管理、系统管理与配置、网络设备管理等，系统的不能也并不是一成不变的，还可根据需求进行扩展。

(1) 用户管理。此功能模块负责完成用户注册、用户登录、权限配置。

(2) 数据文档管理。管理系统测控任务产生的原始数据、分析结果、专家知识等等文档类文件。

(3) 远程专家系统。收录专家信息，完成与远程专家的交互、记录诊断过程与信息数据。

(4) 故障诊断专家系统。根据分析、处理后的数据，对故障进行识别、判断，此功能模块可与车间监测诊断级的故障诊断进行交互，也可单独设计。主要包括推理机、知识库、事实库等主要部分。

(5) 数据分析与处理。这同原始数据地分析与处理有所不同，主要是对已分析完的数据进行汇总、概率分析、年度分析等结果汇总。

(6) 其他功能。远程监测与故障诊断中心具有良好的扩展性，还可添加设备维修记录、维修管理、设备管理、物料管理、仪器配置等

远程监测与故障诊断可以在客户端进行访问，其形式是网页交互，系统完成各个子

系统地协作和交流。

6.5.3 系统实现



图 6.8 登录主页

Fig 6.8 Log home

系统登录主页如图 6.8 所示。主要显示的是系统连接的数控机床点击相应的图片可以查看其详细数据。

点击实时监测选项卡可以看到系统内机床的运行状态纵览，如图 6.9 所示。可以监测系统当前工作状态，包括进给率、转速、所用刀具、加工程序、机器工作模式、闲置原因、故障警报、通信情况等其它信息。



图 6.9 数控机床运行状况总览

Fig 6.9 Overview of CNC conditions

选择其中一个数控机床可以查看更多的监测信息，包括各种加工状态的报警信号以及对工作情况进行的直方图分析。如图 6.10 所示。



图 6.10 数控机床运行详图
Fig 6.10 Detail of CNC condition

数控机床的维护管理主要包括通风系统、冷却系统、电气系统、润滑系统、机械系统等部分，通过维护管理可以监测系统维护历史、维护状态、历史记录、报表打印、维护任务安排等工作。如图 6.11 所示。



图 6.11 数控机床维护管理
Fig 6.11 Maintenance management of CNC

数据报告管理，系统可以完成对各个时期故障诊断报告的汇总、输出等工作。如图 6.12 所示。



图 6.12 数据报告
Fig 6.12 Report of data

加工生产状态管理可以对数控机床的加工状态、主轴运行情况、主轴振动、加工能力、加工效率、零部件等进行汇总，如图 6.13 所示。



图 6.13 加工生产管理
Fig 6.13 Processing management

6.6 本章小结

本章首先对数控机床远程监测与故障诊断系统的总体结构和功能模块进行了划分，其次选取了可编程自动化控制器（PAC）作为实时数据采集系统，确定了 PAC 系统的系统组成模块和参数配置，然后采用 LabVIEW 软件构建数据分析与处理功能模块，并实现了网络化应用系统的构建。

7 结论与展望

7.1 主要结论

本文在分析远程监测与故障诊断的现状、研究意义和关键技术的基础上, 对其在数控机床上的应用进行了验证, 对涉及的网络化测控技术、自动检测技术、智能故障诊断技术、专家系统、虚拟仪器、可编程自动化控制器等多项技术进行了深入的分析研究, 系统将多种技术有机的结合在一起, 并通过网络技术构建适用数控机床的远程监测与故障诊断系统。

(1) 系统地总结了远程监测与故障诊断的国内外发展现状和发展趋势, 阐述了数控机床应用远程监测与故障诊断系统的意义, 分析了研究内容和关键技术。

(2) 针对数控机床的结构及技术特点, 研究了网络化测控系统的相关技术及结构, 确定了数控机床远程监测与故障诊断的框架结构与网络体系, 并提出了 C/S 与 B/S 混合模式的网络化测控系统结构。

(3) 通过对自动化检测技术的研究, 分析了数据采集、信号分析与处理、虚拟仪器技术在数控机床远程监测与故障诊断系统上的应用技术。介绍了利用虚拟仪器进行数据采集、分析与处理的方法, 简要叙述了其实现过程。

(4) 分析了智能故障诊断技术发展, 提出了数控机床故障诊断专家系统, 对其中的故障检测、识别、表示、控制决策等进行了研究与系统设计。

(5) 综合网络化测控技术、自动检测技术、虚拟仪器、可编程自动化控制器及网络技术, 建立了远程监测与故障诊断系统的各功能模块与管理系统, 实现了数控机床远程监测与故障诊断的主要功能。

7.2 工作展望

本系统的构建在理论及原始设计上满足了数控机床远程监测与故障诊断的基本要求, 但是需要在实际应用中验证, 不断完善系统在以下方面的工作:

(1) 网络化应用技术。网络化是实现远程监测与故障诊断的基础支持, 面对众多的网络类型及应用状态, 需要建立更加适用于网络化测控系统的网络结构。

(2) 数据采集技术。数据采集是实现监测与故障诊断的前提,合理有效的数据采集需要进一步在采集系统构建、开放性、扩展性、移植性、网络化、智能化等方面进行深入研究。

(3) 数据分析与处理。故障信号的分析、处理、识别、表示、决策与控制是多学科不断完善的关键技术,本文采用的虚拟仪器技术并不能完善满足各种数据分析与处理任务,还需要建立更多的方法与程序。

(4) 智能故障诊断系统。本文研究应用的只是专家系统在数控机床远程监测与故障诊断的相关问题与技术,具有相对的局限性,应不断采用诸如神经网络、智能体、信息融合等新技术,从而提高故障诊断的水平。

致 谢

本文是在导师钟佩思教授的精心指导和帮助下完成的。本文从选题、课题研究、系统设计到论文撰写整个过程中都凝聚着钟老师的心血和智慧。在三年硕士研究生学习期间，在学业上钟老师给予我悉心指导，在生活上对我无微不至的关心。钟老师学问渊博，治学严谨，工作一丝不苟，平易近人。在此，我谨向恩师表示最诚挚的感谢和最崇高的敬意。

在论文的思路确立及完成过程中，魏军英老师、郭春芬老师、李桂莉老师、丁淑辉老师提出了许多宝贵的意见和建议，帮助作者解决了很多难题，再次表示深深的谢意。

在作者三年的求学生涯中，得到了同窗好友孔锐、张丹丹、钱威、袁珊珊以及先进制造技术研究中心 CAD/CAM 实验各位同学的大量帮助，再次希望我友谊长存，共同开创美好的未来。

感谢山东科技大学机械电子工程学院和研究生学院对我提供帮助的各位老师。

感谢我的家人，他们给予了我最大的精神支持，他们在最恰当的时候给予我最贴心的鼓励和支持，使我最终坚持完成了该论文。

武 伟

2011 年 4 月

参考文献

1. 罗永顺, 李玉忠. 数控机床的远程故障诊断系统中关键技术研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2006(3): 66-69
2. 田兴银, 李斌. 基于Internet的数控设备远程监测和故障诊断系统研究[J]. 计算机与现代化, 2002(4): 8-10
3. S. Khanmohammadi, I. Hassanzadeh, H. R. Zarei Poor. Fault diagnosis competitive neural network with prioritized modification rule of connection weights[J]. Artificial Intelligence in Engineering, 2000, 14(2): 127-132
4. Dan Liu, Guanghua Xu, Lin Lianget al. Study on Information Integration of Condition Monitoring and Fault Diagnosis System in Manufacturing[M]Springer Boston, 2006: 499
5. 张杰. 传感器网络信息采集技术研究[J]. 重庆工学院学报(自然科学版), 2007(10): 88-92
6. Lihui Wang, Weiming Shen, Peter Orbanet al. Remote Monitoring and Control in a Distributed Manufacturing Environment[M]Springer London, 2006: 289
7. Zhixin Wang, Xiong Hu, Zhaoneng Chen. Study of Remote Condition Monitoring and Assessing on Quayside-Container-Cranes[M]Springer London, 2006: 898
8. 黄景德, 刘玉海, 贾长治. 装备故障智能维护系统发展综述(二)[J]. 飞航导弹, 2001(5): 14-16
9. 黄景德, 刘玉海, 贾长治. 装备故障智能维护系统发展综述(一)[J]. 飞航导弹, 2001(4): 34-36
10. 宋刚. 基于网络的数控机床远程协作诊断系统研究[D]: 上海交通大学, 2003
11. 李盘靖. 远程协同故障诊断关键技术及其应用研究[D]: 西北工业大学, 2006
12. 周治贵, 宋刚, 胡德金. CNC机床远程故障诊断服务系统的研究[J]. 机床电器, 2001(5): 19-22
13. Chengen Wang, Lida Xu, Wuliang Peng. Conceptual design of remote monitoring and fault diagnosis systems[J]. Information Systems, 2007, 32(7): 996-1004
14. 王秋彦, 鞠建波, 宋振宇. 故障诊断技术研究现状及发展趋势[J]. 电子测量技术, 2009(4): 5-8

15. 金鑫, 任献彬, 周亮. 智能故障诊断技术研究综述[J]. 国外电子测量技术, 2009(7): 30-32
16. Xing Wu, Jin Chen, Ruqiang Li et al. Internet-Based Remote Monitoring and Fault Diagnosis System[M]Springer Berlin / Heidelberg, 2004: 25
17. 杨廷善. 测控系统总线综述[J]. 测控技术, 1999(5): 1-5
18. 罗安. 现场总线与现场总线控制系统[J]. 自动化博览, 2008(6): 14-16
19. 彭英, 王珺, 卜益民. 现代通信技术概论[M]. 北京市: 人民邮电出版社, 2010
20. 邹益民, 周哲民. 现场总线仪表技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009
21. 何涛, 张刚, 吴庆华等. 基于XML网络测控系统数据集成研究与应用[J]. 工业控制计算机, 2006(11): 33-34
22. 范峥, 田效伍. 现场总线测控网络中的信息集成[J]. 河南机电高等专科学校学报, 2003(1): 58-60
23. 丁祝寿. 动态数据交换DDE的实现原理及实例[J]. 电脑学习, 2002(4): 28-29
24. 王明俊, 张树才, 陈广旭. 装备信息技术概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010
25. 顾春光. 数控机床故障诊断与维修[M]. 北京市: 机械工业出版社, 2010
26. 陈国顺, 宋新民, 马峻. 网络化测控技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 266
27. 袁楚明, 张国辉, 陈幼平等. 基于Web的开放式数控设备远程监控技术研究[J]. 制造业自动化, 2004(3): 36-39
28. 韦乐平, OMG. CORBA系统结构、原理与规范[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000
29. 李念强. 数据采集技术与系统设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009
30. GB/T 7665-2005, 传感器通用术语[S]
31. 钱显毅, 唐国兴. 传感器原理与检测技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011
32. 徐俊臣, 杜玉杰. 智能化传感器的发展趋势及实现[J]. 海洋技术, 2001(1): 74-77
33. 姚道如. 传感器在数控机床上的应用[J]. 国内外机电一体化技术, 2008(1): 2-3
34. 王化祥. 现代传感技术及应用[M]. 北京: 北京化学工业出版社, 2008
35. 俞志根, 左希庆, 周晓邑. 传感器与检测技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010
36. 罗永顺. 数控机床故障信号分析与特征提取[D]: 中南大学, 2007
37. 全国科学技术名词审定委员会. 电力名词(通论部分)[J]. 中国科技词语, 2008(6): 8-11
38. 陆人定. 齿轮箱故障时域和频域综合诊断技术[J]. 机电工程技术, 2007(6): 17-19
39. 朱明武, 李永新, 卜雄洙. 测试信号处理与分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版

- 社, 2006
40. 李舜酩. 振动信号的现代分析技术与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008
 41. 黄惟公, 曾盛绰. 机械工程测试技术与信号分析[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2002
 42. 李增芳. 基于人工智能和虚拟仪器技术的发动机故障诊断专家系统研究[D]: 浙江大学, 2004
 43. 李弼程, 罗建书. 小波分析及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003
 44. 张凯等. LabVIEW虚拟仪器工程设计与开发[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004
 45. 肖纯, 瞿伟廉, 谭冬梅. 虚拟仪器技术在结构远程健康监测中的应用[J]. 通讯和计算机: 中英文版, 2005, 2(2): 44-47
 46. 秦树人. 虚拟仪器[M]. 北京: 中国计量出版社, 2004
 47. 徐章遂. 故障信息诊断原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000
 48. 王福利, 张颖伟. 容错控制[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2003
 49. P. K. Kankar, Satish C. Sharma, S. P. Harsha. Fault diagnosis of ball bearings using machine learning methods[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(3): 1876-1886
 50. Liao Shu-Hsien. Expert system methodologies and applications--a decade review from 1995 to 2004[J]. Expert Systems with Applications, 2005, 28(1): 93-103
 51. Christine W. Chan. An expert decision support system for monitoring and diagnosis of petroleum production and separation processes[J]. Expert Systems with Applications, 2005, 29(1): 131-143
 52. Shaohong Wang, Tao Chen, Jianghong Sun. Design and realization of a remote monitoring and diagnosis and prediction system for large rotating machinery[J]. Frontiers of Mechanical Engineering in China, 2010, 5(2): 165
 53. 陈超山, 王大红. 数控机床故障诊断与维修[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010
 54. Guang-Ming Xian, Bi-Qing Zeng. An intelligent fault diagnosis method based on wavelet packer analysis and hybrid support vector machines[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(10): 12131-12136
 55. 解金柱, 王万友. 机电设备故障诊断与维修[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010
 56. 周东华, 叶银忠. 现代故障诊断与容错控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000
 57. 王仲生. 智能故障诊断与容错控制[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005
 58. 王仲生, 金潞芳. 一种人机交互式故障诊断专家系统的Prolog实现[J]. 微处理机,

- 1992(2): 15-19
59. John F. Sowa. Knowledge Representation: Logical, Philosophical, and Computational Foundation[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003
60. Giarratano, Joseph, Gary Riley. 专家系统原理与编程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000
61. 蔡自兴, 约翰·德尔金, 龚涛. 高级专家系统 原理、设计及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005
62. 张仰森. 人工智能原理与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004
63. 宇鹏. Visual C++实践与提高 ActiveX 篇[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001
64. Frank Ortmeier, Gerhard Schellhorn. Formal Fault Tree Analysis - Practical Experiences[J]. Electronic Notes in Theoretical Computer Science, 2007, 185: 139-151
65. Iang Jianwen, Futatsugi Kokichi, He Yanxiang. Fault tree and formal methods in system safety analysis[J]. Computer and Information Technology, 2006, 24(2): 1108-1115
66. 卜全民, 王涌涛, 汪德燿. 事故树分析法的应用研究[J]. 西南石油大学学报, 2007(4): 141-144
67. 宋文娟. 基于PAC的风力发电机组控制系统研究与开发[D]: 湖南大学, 2008
68. 张重雄. 电子信息与电气学科规划教材 虚拟仪器技术分析与设计 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007

攻读硕士学位期间从事科学研究及发表论文情况

1) 参与的科研项目

(1) “面向区域中小企业的产品创新设计支持系统研究与应用”于 2010 年 12 月通过山东省科学技术厅组织的成果鉴定，成果编号：鲁科成[2010]第 955 号，主要参与者。

(2) “面向并向产品开发的定量化过程分析方法研究与应用”于 2010 年 12 月通过山东省科学技术厅组织的成果鉴定，成果编号：鲁科成[2010]第 956 号，主要参与者。

(3) 实用新型专利：新型多工位现场修复镗孔机，专利号：ZL201020254372.4, (主要完成人：钟佩思、武伟、殷淑芳、刘梅)，2010 年 11 月 04 日


(4) “葡萄酿酒企业快速产品开发信息支持系统研究与开发”，获得 2010 年山东科技大学研究生优秀科技创新成果奖（证书编号：YJS2010004），项目负责人，2010 年 7 月 10 日。





(5) “葡萄酿酒企业快速产品开发信息支持系统研究与开发”，获得 2010 年山东省研究生优秀科技创新成果奖三等奖（证书编号：2010YJS074），项目负责人，，2010 年 9 月 20 日。



2) 发表的学术论文

(1) 孔锐, 钟佩思, 刘梅, 武伟. 基于 Pro/E 二次开发的特征提取技术研究 机械设计与制造 (已录用)

附录 实时数据采集系统硬件组成

名称	 嵌入式实时控制器 NI-9022
说明	NI cRIO-9022 控制器，具有一个 533 MHz Freescale MPC8347 的工业实时处理器，包含 256 MB 的 DDR2 RAM 与 2 GB 的非易失性存储介质，用以实现程序存储与数据记录。
配置	<ul style="list-style-type: none"> • 嵌入式控制器运行 LabVIEW 实时 (Real-Time)，进行确定性控制、数据记录和分析 • 533 MHz 处理器，2 GB 非易失性存储介质，256 MB DDR2 内存 • 双以太网端口，具有配备了远程用户界面的嵌入式 Web 服务器和文件服务器 • 高速 USB 主机端口可连接至 USB 闪存及其它存储设备 • 连接外设的 RS232 串口；9 VDC 到 35 VDC
名称	 机箱 NI-9118
说明	NI cRIO-9118 作为一款 8 槽可重新配置的嵌入式机箱，是 CompactRIO 高性能可编程自动化控制器 (PAC) 平台中的一个器件。其可编程 Xilinx Virtex-5 FPGA，提供高处理能力，并能帮助用户利用 NI LabVIEW 软件设计自定义硬件。
配置	<ul style="list-style-type: none"> • 8 槽可重新配置的嵌入式机箱支持所有 CompactRIO I/O 模块 • Xilinx Virtex-5 可重新配置 I/O (RIO) FPGA 核心，具有高超的处理能力 • 使用 LabVIEW，可自动生成自定义控制和信号处理电路
名称	 NI-9201 电压测量
说明	NI 9201 是 500 kS/s 采样率，8 通道模拟输入的 C 系列模块。对经济型多功能系统而言，NI 9201 以经济的价位，提供了理想的通道数和速度。 与大多数的 C 系列模块相同，NI 9201 可以免受 2,300 V _{rms} 电压尖脉的损害。这意味着：在隔离等级内的有害电压无法对系统中的其他模块、机箱或任何相连的计算机设备造成损害。除了隔离的绝对保护，该产品还针对错误信号连接或每通道的意外输出，提供高达 100 V 的过压保护。
配置	<ul style="list-style-type: none"> • 8 路模拟输入，±10 V 输入范围 • 总采样速率达 500kS/s • 12 位分辨率，单端输入，螺丝端子或 D-Sub 连接器
名称	 NI-9213 温度
说明	用于 NI C 系列外盒的 NI 9213 高密度热电偶模块，专为高通道数系统设计。该模块使你无需占用过多插槽，即可将热电偶加入混合信号测试系统。
配置	<ul style="list-style-type: none"> • 内置 CJC (冷端温度补偿)

	<ul style="list-style-type: none"> • 高速模式适合最高 1,200 S/s 的采样率 (总计) • 250 Vrms 通道-地面接地安全隔离 • 自动调零通道用于偏移误差补偿 • 24 位 ADC, 适合最高 0.02 °C 测量灵敏度 • 支持面向 J、K、T、E、N、B、R 和 S 型热电偶
名称	 NI-9235 应变和电桥
说明	NI 9235 的设计适合具有更多通道数的动态应变测量系统, 该系统基于 NI CompactRIO 或其它兼容性 C 系列硬件。各个模块的 8 路同步通道, 可帮助用户在规模更小、通道更为密集的系统中进行更多测量。
配置	<ul style="list-style-type: none"> • 24 位, 同步 ADC • 10Ks/s/通道适用于动态应变测量 • 内置电压激励适用于 1/4 桥传感器
名称	 NI-9203 电流测量
说明	NI 9203 包括用于高性能控制和监控应用的 8 条模拟电流输入通道 NI 9203 具有可编程的 $\pm 20\text{mA}$ 或 0-20mA 输入范围, 16 位分辨率和 200kS/s 最大采样率。为了防止信号瞬变, NI 9203 具有通道至地面的接地双重隔离屏障 (250Vrms 隔离), 实现了良好的安全性和抗扰性。
配置	<ul style="list-style-type: none"> • 8 路电流输入通道 • $\pm 20\text{mA}$、0-20mA 可编程输入范围 • 16 位分辨率, 200 kS/s 总采样速率
名称	 NI-9425 数字输入
说明	NI 9425 包含工业标准的 37 针 D-Sub 连接器, 为连接 NI 或其它供应商的多种 37 针引脚附件。该产品与工业逻辑电平和信号配合使用, 直接连往各种工业开关、传感器和其它设备。
配置	<ul style="list-style-type: none"> • 32 通道, 7 μs 漏极数字输入 • 兼容 12 V 和 24 V 电平 • 工业标准 37 针 D-Sub 连接器
名称	 NI-9477 数字输出
说明	NI 9477 包含工业标准的 37 针 D-Sub 连接器, 为连接 NI 或其它供应商的多种 37 针引脚附件, 提供了低价位方案。NI 9477 还与工业逻辑电平和信号配合使用, 直接连往各种工业继电器、螺线管和电机。
配置	<ul style="list-style-type: none"> • 32 通道, 8 μs 数字输出模块 • 5 到 60 V 输出范围, 漏极 • 工业标准 37 针 D-Sub 连接器 • 每通道 1 A (每个模块 20 A)

名称	 NI-9234 加速度计和扬声器 (IEPE 传感器)
说明	NI 9234 作为 4 通道 C 系列动态信号采集模块,能配备压电式 (IEPE) 与非集成电路压电式 (IEPE) 传感器,进行高精度音频测量。NI 9234 具有 102 dB 动态范围,并能对加速度传感器和麦克风进行软件可选式集成电路压电式 (IEPE) 信号调理。4 条输入通道借助自动调节采样率的内置抗混叠滤波器,同时以每通道高达 51.2 kHz 的速率对信号进行数字化。
配置	<ul style="list-style-type: none"> • 软件可选的 IEPE 信号调理 (0 mA 或 2 mA) • 每通道最高 51.2 kS/s 采样速率; 交流耦合 (0.5 Hz) • 24 位分辨率; 102 dB 动态范围; 防混叠滤波器 • 4 路同步采样模拟输入, ± 5 V 输入范围 • 兼容智能 TEDS 传感器
名称	 NI-9870 串口通信
说明	NI 9870 系列模块 4 个端口能够经由 CompactRIO 现场可编程门阵列 (FPGA) 接受直接访问,灵活地同串行设备进行通信。模块的各个端口上均配有 64 B 独立缓冲,节省了 CompactRIO FPGA 空间并易于编程。
配置	<ul style="list-style-type: none"> • 4 个 RS232 (TIA/EIA-232) 串口用于 CompactRIO • 14 b/s 至 961 kb/s 的波特率 • 数据位:5, 6, 7, 8; 结束位:1, 1.5, 2; 控制流:XON/OFF, RTS/CTS, 无 • 各个端口上均配有 64 B UART FIFO 独立缓冲 • 8 到 28 VDC 外部供电; 包括 PC-MF4-PT 电缆