



南京航空航天大学  
研究生系列精品教材

# 切削加工实验技术

主 编 左敦稳 徐 锋

副主编 张 丹 孙玉利



科学出版社

南京航空航天大学研究生系列精品教材

# 切削加工实验技术

主 编 左敦稳 徐 锋

副主编 张 丹 孙玉利

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书系统介绍了现代切削加工技术所涉及的实验基础理论和最新技术, 主要内容包括切削实验的设计与数据分析、切屑变形的测量、切削力的测量、切削振动的测试与分析、切削温度的测量、刀具磨损和耐用度的测量与分析、加工表面质量的测量、切削过程仿真模拟以及切削实验的安全、防护与环保等。

本书内容系统、技术先进、范例实用, 满足机械工程类专业宽口径、创新型人才的培养要求。

本书可作为高等院校机械制造类研究生和高年级本科生的教材, 也可作为相关专业工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

切削加工实验技术 / 左敦稳, 徐锋主编. —北京: 科学出版社, 2015.11  
ISBN 978-7-03-045605-2

I. ①切… II. ①左… ②徐… III. ①金属切削-加工工艺-实验技术  
IV. ①TG506-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 212013 号

---

责任编辑: 潘斯斯 张丽花 / 责任校对: 李 影

责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2015 年 11 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2015 年 11 月第一次印刷 印张: 17

字数: 394 000

定价: 65.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前 言

1988年，哈尔滨工业大学袁哲俊教授主编的《金属切削实验技术》教材反映了当时的金属切削实验技术的最新发展成果，成为培养一批又一批的切削加工科学研究与工程技术人员的重要教材。制造科学与技术经过了30多年的发展，切削加工学科的内涵也得到了显著的拓展，材料科学、先进测试技术、计算机技术与传统制造技术的融合，促进了先进制造技术的诞生，切削加工的对象以及测试手段都与20多年前有了明显的差别，新的测试技术也不断涌现。正是在这种背景之下，编者撰写了本书。

切削加工研究目的在于揭示金属和非金属等工程材料切削过程中物理变化的本质和规律，也就是切削过程机理的研究，将切削机理的科学认识用于指导优化切削加工过程。现代切削加工技术的研究，实际上相当大程度是建立在实验研究的基础上，是以切削实验技术为基础的。切削加工实验技术，必须体现出“高速、高效、精密、微细、自动化和绿色化”的现代加工技术特征，并促进现代切削加工理论和技术的发展。

本书的内容主要包括切削实验的设计与分析、切屑变形测量、切削力测量、切削振动分析、切削温度测量、刀具磨损和耐用度的测量与分析、加工表面分析、切削过程仿真模拟以及切削实验的安全、防护与环保等。

本书由南京航空航天大学左敦稳和徐锋主编，各章的作者为：第1章左敦稳，第2章孙玉利和李军，第3章徐锋和庆振华，第4章张丹，第5章徐锋和左敦稳，第6章孙玉利，第7章张丹，第8章孙玉利和左敦稳，第9章徐锋，第10章张丹。此外，庞存辰、户海峰、王王、徐俊华、龚潺、唐晓龙、王杭、张超、杜海遥、魏涛、李瑞、张梦骏、吕程昶等同学参与了本书文字素材的整理工作，李国闻参与了部分图表的制作，特在此对他们的辛勤付出表示衷心的感谢。

由于时间仓促，书中若存在不足之处，恳请广大读者提出宝贵的意见与建议。

编 者

2015年6月

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 切削加工实验设计 .....	1
1.3 计算机辅助切削实验数据采集 .....	5
<b>第 2 章 切削加工技术试验设计与分析</b> .....	13
2.1 引言 .....	13
2.2 试验数据的分析检验 .....	13
2.3 单因素和双因素试验设计 .....	19
2.4 多因素试验——正交试验设计与分析 .....	28
2.5 试验数据的回归分析 .....	35
<b>第 3 章 金属切削切屑变形的测量</b> .....	43
3.1 引言 .....	43
3.2 研究切屑变形的实验方法 .....	43
3.3 切削根部试样的制备 .....	45
3.4 切屑变形的测量 .....	59
<b>第 4 章 切削力测量技术</b> .....	67
4.1 引言 .....	67
4.2 电阻应变片测力仪 .....	69
4.3 应变式测力仪常用变形元件的力学性能 .....	72
4.4 典型应变式测力仪简介 .....	77
4.5 压电晶体测力仪 .....	83
4.6 测力仪的标定 .....	92
<b>第 5 章 切削振动测试分析技术</b> .....	96
5.1 引言 .....	96
5.2 振动测试技术 .....	96
5.3 振动模态分析技术 .....	104
5.4 铣削稳定域分析 .....	114

---

<b>第 6 章 切削温度的测量技术</b> .....	124
6.1 引言 .....	124
6.2 热电偶测温法 .....	125
6.3 红外测温法 .....	148
<b>第 7 章 刀具磨损与耐用度实验技术</b> .....	154
7.1 引言 .....	154
7.2 切削刀具磨损的检测 .....	157
7.3 切削刀具破损的检测 .....	169
7.4 切削刀具耐用度的测试方法 .....	172
<b>第 8 章 加工表面质量的检测</b> .....	191
8.1 引言 .....	191
8.2 表面粗糙度的检测 .....	191
8.3 表面影响层和显微硬度的检测 .....	194
8.4 残余应力的检测 .....	196
8.5 磨削烧伤与裂纹的检测 .....	210
8.6 加工亚表面损伤检测 .....	221
<b>第 9 章 切削过程仿真模拟技术</b> .....	227
9.1 引言 .....	227
9.2 切削加工的有限元仿真 .....	227
9.3 切削加工的分子动力学模拟 .....	246
<b>第 10 章 实验的安全、防护与环保</b> .....	252
10.1 引言 .....	252
10.2 加工试验中的安全与防护 .....	252
10.3 加工试验中的环保 .....	258
<b>参考文献</b> .....	262

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 引 言

进入 21 世纪,制造科学在世界上广泛被认为与信息科学、材料科学、生物科学并列为当今时代的四大支柱学科。制造工业的基础和核心是制造技术,它由设计技术、加工工艺技术、基础设施及其支撑技术组成。其中,加工工艺技术又是制造技术的核心,它由各种加工方法及其制造过程所决定。所谓加工技术,是指采用某种工具(包括刀具)或能量流通过变形、去除、连接、改性或增加材料等方式将工件材料制成满足一定设计要求的半成品或成品的过程技术的总称。加工的目的是获得一定的表面几何形状,并具有一定的几何精度,有时还必须保证加工后的表面(或表面层)满足一定的力学、光学、组织、成分等物理方面的要求,尤其在航空航天、国防等特殊领域更是如此。

切削加工是指用切削工具(包括刀具、磨具和磨料)把毛坯或工件上多余的材料切去成为切屑,使工件获得规定的几何形状、尺寸和表面质量的加工方法。现代加工技术则是指满足“高速、高效、精密、微细、自动化、绿色化”特征中一种以上特征的加工技术<sup>[1]</sup>。

切削加工是现代加工技术中最主要的加工方法。虽然毛坯制造精度不断提高,精铸、精锻、挤压、粉末冶金等加工工艺应用广,但由于切削加工的适应范围广,且能达到很高的精度和很低的表面粗糙度,在现代加工工艺中仍占有重要地位。

## 1.2 切削加工实验设计

### 1.2.1 切削加工实验的要求和内容

切削加工研究目的在于揭示工程材料切削过程中的物理变化的本质和规律,也就是切削过程机理的研究,然后将切削机理的科学认识应用于生产实际,以提高切削效率并改善加工表面质量<sup>[2]</sup>。工程材料包括金属材料和非金属材料切削过程是一个非常复杂的过程,材料切削机理研究包括:

(1)切屑变形。切削过程中材料受到刀具的挤压和摩擦,通常会发生剧烈的弹塑性变形,研究切屑形成过程及其规律是切削加工力学和物理现象的研究基础。

(2)切削力及振动。切削力使得工件材料发生变形,消耗功率,产生切削热,切削力也可以用来衡量工件材料的切削加工性和刀具材料切削加工性的优劣。切削振动会增加加工表面粗糙度,降低零件加工精度,加剧刀具磨损,限制机床极限去除能力以及带来工作环境的噪声污染。

(3)切削热及温度。切削过程所消耗的功,大部分转化为热能,通过切屑、工件和刀具传出,引起切削区域温度的升高,切削热会加速刀具磨损,缩短刀具的耐用度。

(4)刀具磨损和破损。切削过程中,刀具切削部分承受很高的切削力和温度,同时,刀具

与运动着的切屑及工件表面相互接触和摩擦，并逐渐磨损，当磨损到一定程度时，必须更换刀具，否则会影响加工精度，甚至发生机床和刀具的损坏。

(5)加工表面质量。零件加工表面存在加工变质层，虽然很薄，但是其错综复杂地影响着机械零件的精度、耐磨性、稳定性、抗腐蚀性以及疲劳强度。

切削过程所需研究的这些内容涉及复杂的力学、热学和摩擦学等物理现象，而这些物理现象又以不同形式、不同程度影响加工过程，影响加工质量，并且又相互交叉影响。对这些物理现象进行分析的前提是必须精确测量得到这些切削过程物理量。

目前，有限元等工具为研究切削过程中复杂的力学和热学现象以及规律提供了有效的分析工具，但是有限元模型的初始数据与边界数据需要实验提供，模型分析的最后结果需用实验结果来校验。因此，现代切削加工的科学研究，很大程度是建立在实验研究的基础上，研究的手段和方法是以切削实验技术为基础的。

一般来说，科学实验可以分为两类：一类是揭示所研究对象物理本质的研究实验；另一类是考察影响因素对所研究对象影响规律的研究实验。

对于研究对象物理本质的科学实验，应着重考虑的是对某些性质所表示的物理量的测定方法，例如研究刀具磨损的性质，可以将磨损的刀片作扫描电镜观测或金相磨片观察，但如要说明是否有扩散磨损，则必须采用电子探针或离子探针检测。这类实验方案的选择，主要应考虑实验方法能否说明要研究问题的实质，实验方法的精度和可靠程度，最后能否使用这些实验结果和数据做出合理的研究结论。

随着实验技术的发展和提高，测量的精度得到了显著提高。例如测力仪，过去使用机械式和液压传感器的测力仪，只能测平均切削力，测力仪刚度很差，现代应变式和压电晶体传感器的测力仪，不仅有很高的刚度和灵敏度，而且有很高的自振频率；不仅能用于一般切削力的测量，而且可以用在动态切削力的测量。过去长期使用的自然热电偶测切削温度的方法，只能测切削区的平均温度，而新的热像仪则可测出切削区的温度场分布。新测试方法和测试仪器的出现和采用，使切削科研工作提高到一个新的水平，对所研究问题的机理和物理本质进行更深一层的揭示。

对于第二类科学实验，研究周围因素对所研究对象的影响规律问题，实验设计主要是研究如何安排实验条件和实验次数，这对实验工作量和最后实验结论有很大影响。正交实验设计可以用较少的实验次数，得出比较正确的实验结论规律，在切削实验中应考虑采用。

两类科学实验并非有严格区别，而是经常相互联系的。对某些研究对象还不认识时，认识这些现象应是第一类科学实验；对该现象已有一定认识而要得到一些定量的规律时，这已是第二类科研实验了。例如研究某条件下刀具磨损的性质，是机械磨损、黏结磨损还是扩散磨损，作定性研究应是第一类的科研实验。如研究后发现主要是扩散磨损，进一步研究扩散磨损的规律和各因素对它的影响，应属第二类科研实验。如在研究过程中发现某些新因素对扩散磨损有较大影响(如切削剂或刀片材料的微观组织形式)，进一步研究这些问题的影响机理，又是第一类性质的研究实验了。

### 1.2.2 切削加工实验过程

切削加工实验过程，分为实验准备阶段、实验实施阶段、实验结果处理及总结四个阶段，



如图 1.1 所示。

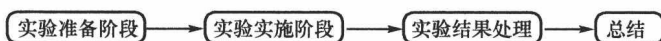


图 1.1 切削加工实验过程

### 1. 实验准备阶段

实验的成功或失败，很大程度上取决于实验的准备阶段。在这一阶段，人们需要确定实验目标、着手实验设计以及进行实验准备，这些工作离不开科学理论的运用以及缜密的逻辑思维。

确立实验目的就是为了明确为什么而进行实验，需要什么理论来设计与开展实验活动。这些指导性理论，就是启发实验者应采用什么方法并从什么方向上去实现已确立的目的。没有这一步骤，就不能从实验目的过渡到具体的实际设计上去。

在明确实验目标之后就开始着手实验设计。实验设计是运用理论进行逻辑推论的过程。实验设计的优劣很大程度上取决于设计过程中的逻辑思维是否严密。比如，在实验设计中，要细致思考到在实验的实施中可能会有哪些偶然性因素发生，这些偶然性因素会对实验效应带来什么影响。

切削实验系统的容量是巨大的，研究对象涉及的因素量是众多的，事物之间的因果关系是复杂的，如何选择正确、实用而先进的实验方法，如何确定正确的实验方案，如何能够减少实验工作量(较少的实验次数)而仍能得出正确的实验结论，这就是实验设计技术要解决的问题。

人们往往把实验仪器、设备、材料的准备当作一种纯物质的活动。其实，每一种仪器都是以某种或某些理论为依据而进行设计和制造的。例如，在进行测量切削力实验中，选择电阻应变片式测力仪，就意味着选择了电阻应变测力原理，而选择压电陶瓷测力仪进行切削力测量则意味着测力原理为陶瓷压电测力原理，每种测力的方法和原理都有其各自的特点，精度、适用性和经济性也各不相同。

### 2. 实验实施阶段

这个阶段就是实验者使用一定的设备进行切削实验，以取得某种所需的数据。仪器设备与实验对象的相互作用是不以人的意志为转移的合乎规律的表现。因此，这个阶段的活动是一种客观的物质活动。作为客观的感性物质活动的实验实施过程正是对人们已有认识的检验，也是提供给人们认识的新事实。

### 3. 实验结果处理与分析阶段

在这一阶段，人们对实验结果进行分析。因为尽管人们在实验设计中做了周密考虑，但在实验的实施过程，仍会有一些事前没估计到的主、客观因素影响实验结果。所谓客观因素主要是指实验仪器设备的偶然变化，实验初始条件、环境条件的偶然变化，实验材料在品种规格上的某些差异等。所谓主观因素主要是指，在实验设计时，遗漏了对一些可能产生的系统误差的考虑，在读取数据时，感官上造成的偏差等。这些因素造成的影响是混合在一起的。因此，人们就必须对实验最初所呈现出来的结果做出分析，以区分什么是应该消除的误差，什么是实验应有的结果。

### 1.2.3 实验原则

在进行切削加工实验时，需要注意以下几项原则。

#### 1. 掌握理论

熟练掌握与实验课题有关的理论和经验。实验方法是在人为的控制下对研究对象进行研究的一个过程，需要精心设计实验方案。在设计实验方案和进行具体实验的过程中，离不开理论的指导和前人经验的积累。实验者只有具备必要的理论知识和实验技能，才能对实验中出现的新事物有敏锐的观察力，当事物表现超出原来的理论框架时，能够及时加以捕捉，并发现其本质。

#### 2. 精心设计

应精心设计，严密组织。俗话说，“知己知彼才能百战不殆”。对所要做的实验，必须精心设计，严密组织，做到心中有数，这样才能使成功率更大。根据一定的理论，结合具体的研究对象，可以采取不同的研究方式。

#### 3. 做好准备

应选择好实验环境，准备好实验工具。俗话说“磨刀不误砍柴工”，实验工具是实验取得成效很关键的一方面，它的状况决定着实验能达到的技术水平。比如，进行高速铣削过程切削力测试时，应正确选择测力仪的采样频率，采样频率过低则无法反映铣削力的正确波形。

#### 4. 控制因素

应能有效地控制影响实验的各种因素。在实验过程中，要根据研究目的来尽量控制实验中的各种因素。要突出主要因素，排除次要因素、偶然因素以及外界的干扰，从而能更准确地认识事物的本质规律。

#### 5. 仔细观察

应仔细观察，尽可能得到精确的数据。比如，在使用电子显微镜进行刀具磨损表面观察时，需要仔细观察前刀面和后刀面的磨损形貌以及元素的分布情况，在此基础上得到刀具磨损的机理。在科技史上，当某些重大发现被公布之后，经常使一些科学家后悔莫及，因为他们也曾见到过类似现象，但由于未加注意而失去了发现的大好时机。法国的约里奥·居里在用粒子轰击铍时打出了中子，但他没有留心而误认为是 $\gamma$ 粒子，让它溜走了。后来，查德威克证明了不是 $\gamma$ 射线而是中子，获得了诺贝尔物理学奖。可见，在科学实验过程中只有仔细观察，才能得到理想的结果。

#### 6. 反复实验

一般说来，在做深入的大规模的实验前，先要做一些探索性的预备实验，先简单后复杂，这样可以为以后的实验工作积累相关的信息和思路。实验要注意其可重复性，只有多次重复，才能表明其成果是能让大家认可的。对于实验过程中出现的有悖常理的数据需要进行反复实验，不要轻易否定或肯定。

## 7. 核对结论

应仔细核对实验后所得出的结论。实验结束后,要对实验中获得的数据作进一步的加工、整理,从中提取出科学事实或某种规律性的理论。在分析过程中,要利用统计分析的方法,借助于计算机等手段来从数据之间的因果关系、起源关系、功能关系、结构关系等多角度、多层次地进行处理与分析。

## 1.3 计算机辅助切削实验数据采集

随着计算机应用的普及,切削实验数据的采集和处理越来越多地使用计算机。使用计算机后,可以在进行切削实验的同时自动采集和处理实验数据,及时给出原始实验数据和处理后的实验结果,能自动分析实验数据的可靠性,发现错误数据,及时做补充实验。采用切削实验数据采集处理系统不仅可以大大节省处理切削实验数据所需时间,而且可以使用更好的数据处理方法,使得到的实验结果、结论更符合实际。

### 1.3.1 实验信号的采集

在切削实验中,被测的物理量是切削力、切削温度、刀具磨损量、切削表面的粗糙度和残余力等。测试时一般需使用相应的传感器,将被测的物理量转换成电信号。转换成的电信号一般是模拟量,可用电表指示读数也可用记录仪器绘出波形图。使用计算机来采集处理这些实验信号时,需将电模拟信号转换成数字信号,应先分析这些实验信号的特性,以便正确转换。

切削实验中被测的物理参数如切削力、温度、磨损量等都转换成便于观测的电信号而进行观测,被观测的实验信号可分为确定性的信号和非确定信号两类,通常以实验能否重复产生这些信号为依据来判断信号是确定性的还是非确定性的。

确定性信号可以进一步分为周期信号和非周期信号,周期信号又可分为正弦周期信号和复杂周期信号。

确定性信号可以用数学关系式来描述。任何确定性信号都可用一个时间函数来表达,但实际信号都比较复杂,直接用时间函数对其进行分析处理有困难时,可将复杂信号展开成某种类型的基本信号之和,这些基本信号必须是一些易于实现、分析和处理的信号,应用最多的是不同频率的正弦信号。

非确定性信号无法用数学关系式来表达,因而也无法预测其未来瞬时的数值,一般只能用实验方法测量,用概率统计特征值来描述。

复杂信号包含着许多有用的信息,根据测试目的不同,必须对信号进行不同项目的测定和分析。如要知道信号强度,需要测定信号幅值和场值。要知道信号的波动程度,需要将信号分解为稳定分量和波动分量,稳定分量用信号对时间的代数平均值来描述,波动分量用信号的方差来描述。要知道信号的频率结构和在各频率上的强度分布需要在频率域上对信号进行频谱分析。

切削实验中有多种不同的信号,不同研究目的时信号的处理方法不同,如切削力信号是复杂的随机信号,在研究切削参数影响切削力大小的规律时,需用切削力的场值;而在研究

动态切削力时，就需要对切削力进行时域、频域或幅值域的分析。

采用计算机来处理实验结果数据，首先需要将测量数据数字化，即 A/D 转换。数字化过程包括采样和量化两步骤，前者是确定采样的瞬时点位置，后者是将采样点数据的瞬时值转化为数字值。

数字化过程的精度，即数字化后的波形和原始波形的拟合程度取决于采样时间间隔  $\Delta t$  (或采样频率  $f_s$ ) 和量化时的幅值增量  $\Delta x$ 。

通常采用等时间间距  $\Delta t = \text{const}$  的采样方法。

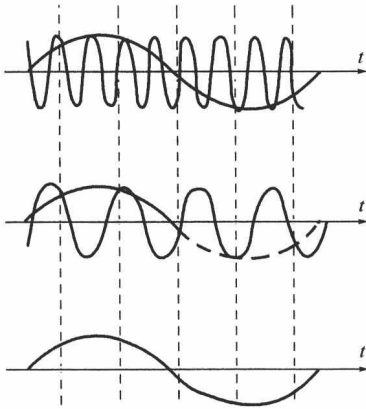


图 1.2 频混现象

采样间距  $\Delta t$  应取得适当，若  $\Delta t$  过小，要求采样速度快，计算机内存量大，而且数据的数量  $n$  就过多，大大增加计算时间；若  $\Delta t$  过大，则无法辨认信号中的某些高频分量，将有一部分高频分量错译成虚假的低频分量，出现频混现象，如图 1.2 中，三种不同频率的正弦信号在采样点上，离散值完全相等，因此采样后三者没有差别。

根据采样定理，要确认一个正弦信号的频率，至少要对信号做每周期两次以上的采样，即采样频率  $f_s = 1/\Delta t$  至少要大于信号频率  $f$  的两倍，即  $f_s \geq 2f$ ，高于这频率的其他分量，将被错认为相应的低频分量。频率  $f_c = f_s/2$  就是在采样时间间隔内能辨认的信号最高频率，称为截止频率。

频混是由于采样频率不够高所引起的，解决的办法如下。

(1) 提高采样频率。使采样频率  $f_s > 2f_c$ ，但  $f_s$  不能过大。 $f_s$  过大，不仅增加计算机内存占用量和计算量，还会使频域的频率分辨率下降过多。

(2) 使用消除频混滤波器。在采样前，用截止频率为  $f_c$  的消除频混滤波器，先将信号低通滤波，将不感兴趣或不需要的高频成分滤掉，然后再进行采样和数据处理。这种方法既实用又简单。消除频混滤波器是一个低通滤波器，应有良好的截止特性。

(3) 消除频混滤波器与提高采样频率联合使用。实际上，由于信号频率都不是严格有限的，而且实际使用的滤波器也都不具有理想滤波器在截止频率处的垂直截止特性，故不足以把稍高于截止频率的频率分量衰减掉。所以，在信号分析中，常把上述两种方法联合使用。即先经低通滤波器滤波后，再将采样频率提高到  $f_s = (3 \sim 5)f_c$ ，再对信号进行采样与处理。

量化就是把采样信号的幅值与某个最小数量单位的一系列整倍数比较，以最接近于采样信号幅值的最小数量单位倍数来代替该幅值。最小数量单位称为量化单位，用  $q$  表示。

设某信号的采样情况如图 1.3 所示，每  $1/f_s$  秒采样一次，将信号值分为若干量化等级，等级间之差为  $q$ ，采样信号将按四舍五入的原则计值，即采样信号幅值中小于  $q/2$  的部分，舍去；大于或等于  $q/2$  的部分，计入。信号的量化为下一步数字化做了准备，每一量化等级都可以方便地以一定的数字符号与之对应，化为数字值。

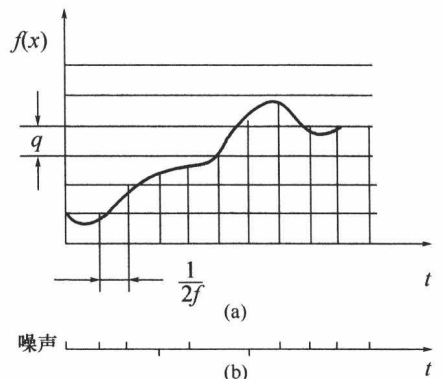


图 1.3 量化误差

如图 1.3 所示, 由于量化过程中进行了“四舍五入”, 因此量化后的信号值和相对应的原始信号值是有差别的, 即由量化而带进了误差, 这就等于在量化过程中在信号上叠加了噪声, 量化噪声大小取决于量化级差  $q$ , 因此在决定采样参数时应根据允许的测量误差决定量化级差  $q$ 。

### 1.3.2 基于虚拟仪器的切削实验数据采集系统

#### 1. 虚拟仪器

虚拟仪器 (Virtual Instruments) 是指通过应用程序将通用计算机与功能化模块结合起来, 用户可以利用计算机强大的图形环境和在线帮助功能, 建立中 (或英) 文界面的虚拟仪器软面板, 完成对仪器的控制、数据分析、存储和显示, 改变传统仪器的使用方式, 提高仪器的功能和使用效率, 大幅度降低仪器的价格, 且使用户可以根据自己的需要定义仪器的功能<sup>[3]</sup>。1997 年, 美国国家仪器公司 (National Instruments, NI) 发布了一种全新的开放性模块化仪器总线规范 PXI。PXI 是 PCI 在仪器领域的扩展 (PCI eXtensions for Instrumentation), 它将 Compact PCI 规范定义的 PCI 总线技术发展成适合应用于实验、测量与数据采集场合的机械、电气和软件规范, 从而形成了新的虚拟仪器体系结构。自从 NI 公司率先提出虚拟仪器概念至今已有十几年。今天, 全世界的工程师和科学家们在各种应用系统中使用“虚拟仪器”, 达到了缩短开发时间、提高产品品质并降低生产成本的共同目的。同时, 虚拟仪器技术也正在趋于成熟和完善。

虚拟仪器系统通常由个人计算机、测量电路模块和应用软件组成。计算机作为构建虚拟仪器必不可少的硬件, 它的存在为用户使用基于计算机操作系统的各种软件提供了方便的平台。测控电路模块包括各种各样的插卡式或外置卡信号调理电路板。数据采集卡 (Data Acquisition, DAQ), 也算是带计算机接口的测量仪器。这些模块可以很方便地把电信号送入计算机, 电信号可以是模拟的, 或数字的。所以说 DAQ 卡和调理板在虚拟仪器系统中起的作用是把测试现场的信号准确、安全、可靠地输入计算机。

从构建方式来讲, 有以 DAQ 卡和信号调理部分为硬件而组成基于计算机的 PC-DAQ 测试系统、GPIB (通用接口总线) 仪器控制系统和 VXI 仪器系统。虚拟仪器系统的基本构成框图如图 1.4 所示。目前较为常用的虚拟仪器系统是数据采集系统、GPIB 仪器系统、VXI 仪器系统以及它们三者的组合。

##### 1) 数据采集系统构成方法

一个典型的数据采集系统由传感器、信号调理电路、数据采集卡 (板) 和计算机四部分组成。一个好的数据采集产品不仅应具备良好的性能和高可靠性, 还应提供高性能的驱动程序和简单易用的高层语言接口, 使用户能较快速地建立可靠的应用系统。计算机从 DAQ 卡接收测量数据以后, 数据采集软件把数据流改编成一种人能理解的模式, 如表格、图表来显示这些处理过的数据。还可以通知采集系统什么时候开始采集, 从哪个通道开始采集。典型的 DAQ 软件包括应用软件、仪器驱动软件。仪器驱动使用各种总线创建仪器命令来帮助仪器与计算机通信, 仪器驱动的存在, 不仅可以大大减少软件的开发时间, 而且可以使测试程序更加强大。

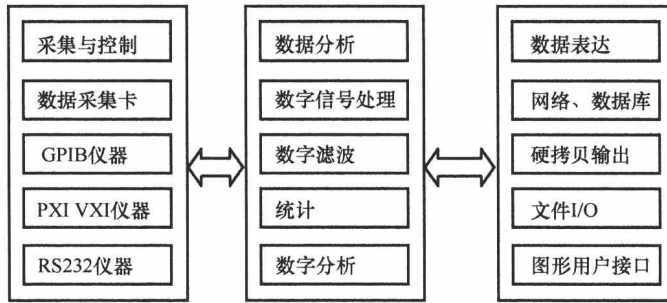


图 1.4 虚拟仪器的功能组成

近年来，多层电路板，可编程仪器放大器，即插即用、系统定时控制器，多数据采集板实时系统集成总线，高速数据采集的双缓冲区以及实现数据高速传送的中断、DMA 等技术的应用，使得最新的数据采集板卡能保证仪器的高准确度与可靠性。

### 2) GPIB(通用数据总线)仪器系统构成方法

一般来说，GPIB 技术在虚拟仪器技术发展的初级阶段功不可没。GPIB 成功地将可编程仪器与计算机紧密联系起来，从此，电工电子测量用仪器由独立的、手工操作的、单台式的向组成大规模自动测试系统方向前进了一大步。一个典型的 GPIB 仪器系统由一台 PC 机、一块 GPIB 接口板卡和若干台 GPIB 仪器通过 GPIB 标准总线连接而成。

### 3) VXI(Virtual eXtention for Instrument)仪器系统构成方法

虚拟仪器系统中最引人注目的应用是基于 VXI 总线平台技术的自动测试仪器系统，VXI 总线平台弥补了 PC 平台无统一插卡物理结构、机箱结构不利于散热和插卡接触可靠性差等缺陷；在 VME(Versabus Module European)总线的基础上，从电磁干扰(EMI)、冷却通风功率耗散等方面考虑，增大了模块的间距及模块间的通信规程、配置、存储器定位和指令等，为模块式电子仪器提供了一个开放式结构，成为模块式测试系统的关键支撑技术。

虚拟仪器比传统仪器在概念和功能上有重大突破。通常，在完成某个测试任务时，需要许多仪器，如示波器、电压表、频率分析仪、信号发生器等，对复杂的数字电路系统还需要逻辑分析仪、IC 测试仪等。这么多的仪器不仅价格昂贵，体积大，占用空间，而且相互连接起来也费事、费时。

而虚拟仪器将计算机资源与仪器硬件、DSP(Digital Signal Processing)技术结合，在系统内共享软硬件资源，既有普通仪器的功能，又有一般仪器所没有的特殊功能。它把由厂家定义仪器功能的方式转变为由用户自己定义仪器功能，用户可根据测试功能的需要，自己设计所需要的仪器系统，只要将具有一种或多种功能的通用模块相组合，并且调用不同功能的软件模块，就能组成不同的仪器功能。将传感器采集的电信号放大和整形后，经 A/D 变换存入内存，再由计算机软件处理，并显示输出，就可以组成虚拟示波器、虚拟计数器、频谱分析仪、虚拟多用表等。利用 DSP 及相应的算法，将所生成的数据送入 D/A 变换器，再经信号调理产生所需的信号，又可构成虚拟信号发生器。当测试要求改变时，只要增加或更换仪器软硬件模块，就可以构成新的仪器，而不必重新购买整台仪器。因此虚拟仪器充分发挥了计算机的作用，便于与计算机通信相结合来建立计算机网络，组建复杂的测试系统。利用虚拟仪器思想建立的测试系统提高了测量精度、测量速度，减少了开关、电缆，系统易扩充、易修改，使得测试系统体积小、灵活方便、成本低、效率高，成为现代测试系统发展的主流。

虚拟仪器没有常规仪器的控制面板，而是利用计算机强大的图形环境，在计算机屏幕上建立图形化的软面板来替代常规的仪器控制面板。软面板上具有与实际仪器相似的旋钮、开关、指示灯及其他控制部件。用户通过鼠标或键盘操作软面板，检验仪器的通信和操作。在系统集成后，对被测对象进行数据采集、分析、存储、显示，组建自己所需要的仪器。用户不用编写测试程序，即可进行测试、测量，实现了测试的自动化、智能化，体现了“软件就是仪器”的思想。虚拟仪器与传统仪器的最大不同之处，就在于应用的灵活性，功能的重构性上。虚拟仪器的功能可由用户根据自己的需要来定义，将各种计算机平台、硬件、应用软件和附件结合起来，组成用户需要的特定应用设备。一台虚拟仪器可具备信号发生器、数字万用表、数字存储示波器、数据记录仪和信号分析仪等多台传统仪器的用途。表 1.1 是虚拟仪器与传统仪器的差异性。

表 1.1 虚拟仪器与传统仪器的差异

传统仪器	虚拟仪器
功能由仪器制造商定义并固定	功能由用户定义
硬件是关键	软件是关键
仪器封闭，与其他仪器连接受限	基于计算机的开放系统
价格高，开发、维护费用高	价格低，软件结构可节省开发和维护费用
技术更新慢	技术更新快
界面小而呆板，不友好	友好的中英文图形界面仪器通用化和网络化

LabVIEW 是 NI 公司在 1986 年推出的一种基于图形编程语言的开发环境，它具有十分强大的功能，包括数值函数运算、数据采集、信号处理、输入/输出控制、信号生成、图像获取、处理和传输等。LabVIEW 与 C、Pascal、Basic 等传统编程语言有着诸多相似之处，如相似的数据类型、数据流程控制、程序调试工具，以及模块化的编程特点等。但二者最大的区别在于：传统编程语言用文本语言编程，而 LabVIEW 使用图形语言（即各种图形、图标、连线等）编程，界面非常直观形象，而且用的都是使用者熟悉的按钮、开关、波形图等，因此是一种直觉式图形语言。用 LabVIEW 无需太多编程经验，只要以很直觉的方法建立用户面板、人机界面和方块图程序，便可以完成编程过程，这对于一般的科研人员或者学习者来说是个好消息。同时 LabVIEW 的执行顺序是以方块图数据的传递来决定的，并不像传统文字式程序语言必须逐行执行，因此用户能设计出可同时执行多个程序的流程图，使其实现并行处理，提高数据处理能力。

LabVIEW 包括三部分：用户面板、框图程序、图标/接线端口。用户面板用于模拟真实实验仪器；图形程序是利用图形语言对用户面板上的控件对象进行控制；图标/接线端口用于把 LabVIEW 程序定义成一个子程序，从而实现模块化编程及仪器功能。使用 LabVIEW 编程的主要特点就是虚拟实验仪器分解为若干个基本功能模块（相当于硬件设施中的集成电路），模块的引脚代表输入/输出（I/O）接口。使用者可以通过交互式手段采用图形化框图设计的办法，完成虚拟实验仪器的逻辑分析和测量分析功能设计，而程序框图则实现了代码功能，节省了一般程序设计从框图构思到程序表示的步骤。LabVIEW 还具有另外一个优点就是它把软件界面设计与功能实现互相独立出来，对于修改和调试非常方便。LabVIEW 还提供了函数扩展功能从而可以调用 C/VC++/Basic 等传统语言写的程序代码、调用标准动态链接库函数实现

丰富的功能。

## 2. 基于 LabVIEW 的切削过程测试系统

在基于 LabVIEW 为开发平台的, 面向切削加工过程的虚拟测试系统的设计中, 切削力与切削温度是金属切削过程中的重要状态参量<sup>[4]</sup>。切削力和切削温度测量是金属切削研究中一项重要实验技术, 不仅对研究金属切削机理, 计算机床功率, 进行刀具、机床、夹具的设计, 优化切削用量和刀具几何参数等具有非常重要的意义, 而且在自动化生产中, 切削力以及切削温度是切削过程自适应控制中的重要参数, 也是监测切削过程和刀具工作状态的重要信号。切削参数测量不仅可以研究切削机理、计算功率消耗、优化切削用量和刀具几何参数、校核切削力理论计算的准确性, 而且可以反映切削用量合理性、机床故障、颤振等切削状态。随着计算机技术和虚拟仪器技术的发展, 在加工过程中切削过程参数的计算机辅助测量这个课题被注入了新的活力。

采用虚拟仪器测量切削参数, 能完全替代传统仪器并扩展其功能, 并且虚拟仪器能最大限度地降低系统成本, 增强系统的功能和灵活性。利用通用计算机的硬件资源, 集仪器的控制、存储、显示于计算机本身, 利用相应的软件在计算机屏幕上构成一个虚拟仪器的仪器面板, 通过键盘或鼠标代替现实仪器的面板按钮及旋钮, 而人手不必触及仪器本身, 从而实现硬件软化的结果, 并在足够硬件的支持下, 对金属切削过程的切削力、切削温度等参数进行采集, 再经软件处理, 从而反映刀具磨损或破损、切削用量的合理性、机床故障等切削状态, 以及实时控制切削过程, 尽可能提高切削效率, 并减少零件废品的产生。

### 1) 测试系统硬件

在金属切削实验中, 被测的物理量是切削力、切削温度、刀具磨损量、切削表面的粗糙度和残留应力。测试时一般需使用相应的传感器, 将被测的物理量转换成电信号。一般测切削力选用测力仪, 测温度常采用自然热电偶法。而在选择数据采集卡时常需要考虑以下问题。

#### (1) 模拟输入的采样方式。

模拟输入的通道数目是由卡上两种类型的输入——单端输入和差分输入决定的。单端输入都有一个共同的接地点。它主要用于测量大于 1V 的输入信号, 从信号源到模拟输入硬件的导线很短, 所有的输入信号共用一个接地点。如果信号不满足这些标准, 就应使用差分信号。每个差分输入都有自己的接地参考点。因消除了连线引起的共模噪声, 随之也减小了噪声误差。考虑到实验机的具体情况, 测量点和数采卡有一段距离, 所以采用差分输入方式。

#### (2) 采样率。

高的采样率是在一定的时间内获取更多的点, 因而能更好地表现原始信号。奈奎斯特(Nyquist)采样定理指出, 采样率必须高于被测量信号的最高频率的两倍。

#### (3) 多路转换。

所谓多路转换, 就是将多路转换器与某一通道接通, ADC(模数转换器)对此采样, 然后多路转换接通到下一个通道采样。实验机的设计需要测量摩擦力和载荷两路信号, 所以需要—一个采样通道大于两路的数采设备。

#### (4) 分辨率。

ADC 用位数来表示模拟信号, 这就称为分辨率, 也就是所进入区域的划分数越大, 检测的电压分辨率就越高。



### (5) 动态范围。

动态范围就是 ADC 进行量化的最小和最大电压之间的电平。一些数据采集卡提供所选的范围,使得数据采集卡能处理各种不同的电压电平。具有这样的灵活性,就能将信号范围与 ADC 的范围进行匹配,有效地利用分辨率,得到精确测量的信号。DAQ 卡上的范围、分辨率和增益决定最小可测的电压改变。这个电压改变表示了数字值的 1LSB(最低有效位),常被称为代码宽度。理想的代码宽度是电压范围除以增益乘 2 的位分辨率次方。由于实验机所有的测量信号都在 0~10V,所以选择一款输入电压范围可以在 0~10V 的数据采集设备就可以达到要求。

现在生产数据采集卡的厂家很多。但是如果选择一般厂家生产的数据采集卡,编辑数据采集和控制程序的时候都要涉及一些底层程序的编写,增加了整个系统设计的难度。考虑到以上原因,选择 NI 公司生产的数据采集卡。这样在数据采集和控制程序的开发过程中就可以使用 NI 公司开发的 LabVIEW 这一虚拟仪器设计软件,从而大大降低了整个系统的复杂程度。

### 2) 确定采样频率

输入信号的采样率是最重要的参数之一。采样率决定了模数转换(A/D)的频率。较高的采样率意味着在给定时间内采集更多的点,所以可以更好地还原原始信号。而采样率过低则可能会导致信号混频。

根据奈奎斯特定理,为了防止发生混频,最低采样频率必须是信号频率的两倍。对于某个给定的采样率,能够正确显示信号而不发生畸变的最大频率叫作奈奎斯特频率,它是采样频率的一半。如果信号频率高于奈奎斯特频率,信号将在直流和奈奎斯特频率之间畸变。

### 3) 切削实验数据采集实例

切削温度与切削力的测量对金属切削实验的研究具有重要的意义,因此本节简单介绍切削温度与切削力测试系统的设计过程及实现功能。

在 LabVIEW 中,要实现各种测量,需要通过 DAQ 数据采集卡将信号采集到计算机中。而 DAQ 数据采集卡对输入的各类信号会有一些的要求。因此,在将传感器中的信号送入数据采集卡前大多要经过调理,以满足采集卡的要求。可见,一个完整的数据采集系统的硬件应包括:传感器、信号调理设备、数据采集卡和计算机。切削力与切削温度的测试系统结构示意图如图 1.5 所示。

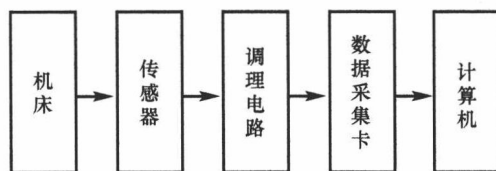


图 1.5 测试系统结构示意图

程序流程图的绘制是必不可少的,它是整个程序编制的“指挥部”,程序根据设定好的程序流程图进行一步一步地编制。所需实现的每个功能都需要结合程序流程图,进行算法的设定,最后得到完整的软件。

软件前面板是人机交互部分,面板由实验设置部分、实时显示部分和实验控制部分组成,如图 1.6 所示。