

高等学校试用教材

金属切削实验技术

哈尔滨工业大学 袁哲俊 主编

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

试用教材

实验技术

袁哲俊 主编

机械工业出版社

前 言

金属切削的科学研究有理论研究和实验研究两个方面。由于金属切削是一个十分复杂的过程,影响因素众多且又交叉关联,因此到目前为止,实验研究仍在金属切削研究中占主要的地位。不仅是常遇到的切削过程优化、优选切削参数等实用问题要靠实验研究解决,而且揭露切削过程物理本质和规律的机理的研究,也要靠实验的支持、配合和验证。因此现代金属切削科学研究是在相当大程度上是以实验研究为基础的,并随着金属切削实验技术的发展而发展的。

近年来,金属切削实验技术有着很大的发展和提高,出现了不少新的实验方法和新仪器。扫描电镜、透射电镜、能谱仪、电子探针、离子探针、俄歇仪等已在金属切削实验研究中得到应用,使切削变形过程机理和刀具磨损本质的研究产生突破,达到新的高度;新型高刚度、高灵敏度、高自振频率测力仪的出现,使动态切削力的测量成为现实。光纤和高灵敏度热象仪的应用,使切削和磨削区的温度场可以直接测量。切削过程参数的自动在线检测方法的应用,使切削加工自动化和切削自适应控制的实现有了可能,实验数据的计算机自动采集和一些现代数据处理方法的实际使用,使切削实验技术得到新的提高。所有这些,不仅发展和提高了金属切削实验技术,而且大大提高了整个金属切削技术的研究。

当前,金属切削研究的中心课题是围绕着提高切削效率、提高刀具寿命、改善加工表面质量、发展自动化和自适应控制技术等方面进行的。要较好地研究解决这些问题,必须研究金属切削(磨削)时的金属变形、切屑形成、切削力、切削热、刀具磨损和耐用度、加工表面质量等的实验技术。因此,这些问题也是本书第二至第六章将要详细讨论的主要内容。

实验前,应对准备进行的实验有一通盘的全面的规划,并进行实验设计、编写实验大纲;实验后,进行实验数据的处理。这部分内容将在第一章和第七章分别介绍。

由于现在还缺少系统讲述金属切削实验技术的书籍,故本书对金属切削研究的基本实验方法和常使用的仪器装备均作了较详细的叙述,以使读者能较好地掌握金属切削的主要实验技术。另外,为了便于读者了解金属切削实验技术的发展动态,本书对金属切削实验的一些最新测试技术、测试方法和现代测试仪器,也作了适当的介绍。

本书于1986年经高等学校机械专业教材编审委员会刀具组审议通过,可以作为机械制造工艺及设备专业的本科和研究生的选修课教材。本书也可供科研单位和工厂的工程技术人员进行金属切削研究工作时参考。

本书各章的作者为:第一章西北工业大学唐莽、哈尔滨工业大学袁哲俊,第二章华南工学院张发英,第三章袁哲俊,第四章南京航空学院浦学锋,第五章北京理工大学王育民,第六章华南工学院陈澄渊,第七章唐莽、王育民。本书由袁哲俊主编,由华中理工大学、陈日曜、华南理工大学周泽华主审。全书编写过程中得到南京航空学院张幼楨的指导,并得到蔡礼君和杨南祥的协助,特此表示感谢。

由于作者水平有限,编写又匆忙,书内必存有一些不足之处,望读者帮助指正。

作者 1987年11月

目 录

第一章 金属切削实验设计	1	二、剪切角的测定	32
§ 1-1 金属切削实验设计的任务与要求	1	§ 2-6 用网格法研究切削过程的金属变 形	33
§ 1-2 实验计划、实验大纲和实验报告的 编写	2	§ 2-7 电视技术和高速摄影技术在切削过 程研究中的应用	35
一、实验计划	2	参考文献	37
二、实验大纲	3	第三章 切削力测量和测力仪设计原 理	38
三、实验报告	4	§ 3-1 切削力测量的一般问题	38
§ 1-3 正交实验设计	4	一、对切削力测量和测力仪性能的基本要 求	38
一、有关的术语和符号	4	二、测量方法和测力传感器的选择	39
二、实验设计方法的选择	5	三、和测力仪配套使用的仪器	39
三、正交表和正交实验设计法	6	§ 3-2 电阻应变片测力传感器的电桥电路 和电补偿原理	39
§ 1-4 回归的正交设计	8	一、电阻应变片的工作原理	40
§ 1-5 计算机辅助切削试验数据采集与处 理	11	二、电阻应变片的测量电路	40
一、实验信号的分析与采样	11	三、应变片的连接电路和电补偿原理实例	41
二、微机切削数据采集和处理系统实例	13	四、消除切削力作用点位置变化的影响	43
参考文献	15	§ 3-3 应变式测力仪常用变形元件的力学 性能	43
第二章 切削过程和切屑形成过程实 验	17	一、直筋式变形元件的力学特性	43
§ 2-1 快速落刀技术——切屑根部的取 得	17	二、环式变形元件的力学特性	45
§ 2-2 切屑根部金相标本的制备	19	三、薄壁圆筒变形元件的力学特性	46
一、切屑根部标本的嵌装	19	§ 3-4 应变式测力仪高刚度结构的设计原 理	47
二、试样表面的制备	20	一、减少测力仪的非必要刚度损失	47
三、试样的抛光	21	二、正确选择变形元件及合理确定尺寸 参数	48
四、显微组织的显现——金相腐蚀	21	§ 3-5 典型应变式测力仪简介	50
§ 2-3 金相显微镜的简单原理	22	一、车削测力仪	50
一、透镜的色差和球面象差	23	二、钻削测力仪	51
二、光学系统的分辨本领	24	三、铣削测力仪	52
§ 2-4 透射式电子显微镜原理及试样制 备	25	四、其他测力仪	55
一、透射式电子显微镜的原理	25	§ 3-6 使用压电晶体传感器的测力仪	51
二、静电透镜和磁透镜	26	一、石英晶体的压电效应	51
三、透射式电子显微镜的光路原理	27	二、压电晶体传感器	51
四、试件的制备	28		
§ 2-5 变形系数和剪切角的测定	29		
一、变形系数的测定	29		

三、用压电传感器的测力仪	56	§ 4-4 其他测温方法	100
四、压电式测力仪的使用	58	一、显微结构分析法	100
§ 3-7 测力仪的标定	58	二、示温涂料法	100
一、静态标定	58	三、热量计法	102
二、分力相互干扰的消除	58	四、用实验测温与数值分析结合的方法	
§ 3-8 测力仪的动态响应	59	测定工件表层温度分布	103
一、测力仪的开环特性	59	参考文献	107
二、测力仪的闭环特性	60	第五章 刀具磨损及耐用度实验	108
§ 3-9 测力仪的动态误差	61	§ 5-1 刀具的磨损形态	108
一、幅值误差	61	§ 5-2 刀具磨损的检测	109
二、波形畸变误差	62	一、后刀面磨损的测量	109
三、切深残余误差	62	二、前刀面磨损的测量	110
§ 3-10 限制动态误差的方法与动参数设计	63	三、用扫描电镜、电子探针仪、俄歇仪研究刀具磨损	111
一、测力仪固有频率的设计公式	63	§ 5-3 刀具耐用度的标准试验法	115
二、使畸变误差最小的阻尼比	64	一、刀具耐用度的评定	116
三、给定 δ 限制, 使带宽频率 ω_b 最大的阻尼比	65	二、刀具耐用度的标准试验法	117
四、给出 ω_b , 使 δ 最小的阻尼比	65	三、车床的无级调速	118
五、使切残误差最小的阻尼比	66	§ 5-4 刀具耐用度的快速试验法	121
六、提高测力仪动态精度的其他方法	67	一、相对磨损率试验法	121
§ 3-11 阻尼器与校正网络	69	二、以 V_B 为函数的磨损方程法	122
一、单面阻尼器	69	三、端面车削试验法	122
二、共轭阻尼器	70	四、阶梯车削试验法	124
三、可调阻尼间隙共轭阻尼器	70	五、积累损伤理论法	127
四、“电阻尼”校正网络	71	§ 5-5 刀具磨损的在线检测方法	128
参考文献	72	一、刀具磨损在线检测概述	128
第四章 切削热和切削温度的测定	73	二、光学摄像检测法	129
§ 4-1 切削、磨削区温度测定方法概述	73	三、切削力变化检测法	130
一、切削温度的测定区域	73	四、用振动信号检测刀具磨损	132
二、切削温度测定方法分类	74	五、用声发射信号检测刀具磨损	134
§ 4-2 切削温度的热电偶测量法	75	六、用电动机功耗检测刀具磨损	134
一、热电偶测温的基本原理	75	七、多参数综合判据检测刀具磨损	135
二、用热电偶法测刀具和工件接触面温度	78	§ 5-6 刀具破损的检测	135
三、用热电偶法测工件的温度分布	81	一、刀具破损的特点	135
四、热电偶测量中的几个实用问题	83	二、刀具破损形态的观察	136
§ 4-3 红外测温法	95	三、刀具破损的检测预报	137
一、红外测温法的基本原理	95	四、刀具破损耐用度的实验方法	138
二、红外点温度计法测切削区温度场	96	参考文献	142
三、用热象仪法测切削区温度场	96	第六章 表面质量的检测	143
四、使用光导纤维红外测温法	97	§ 6-1 表面粗糙度的检测	143
		一、表面粗糙度标准	144
		二、表面粗糙度的测量方法	144

§ 6-2 表面变质层和显微硬度的检测.....145	六、关于函数类型的选择189
一、表面变质层145	§ 7-3 一元线性回归分析.....190
二、显微硬度的检测147	一、一元线性回归的回归方程190
§ 6-3 表面残余应力的测定.....148	二、回归方程的显著性检验192
一、残余应力及其测定方法简介148	三、相关系数194
二、X射线衍射法测定表层残余应力151	四、利用回归方程进行预报和控制195
三、通过表面剥层使应力松弛法测定表面残余应力158	§ 7-4 多元线性回归分析.....197
§ 6-4 磨削烧伤和裂纹的检测.....164	一、多元线性回归的数学模型197
一、磨削烧伤164	二、参数 β 的最小二乘估计198
二、磨削烧伤的检测164	三、线性回归数学模型的另一种形式200
三、表层裂纹检测165	四、回归方程的显著性检验205
参考文献168	五、回归系数的显著性检验207
第七章 切削实验的数据处理169	六、利用回归方程进行预报和控制208
§ 7-1 实验数据的分析检验.....169	§ 7-5 方差分析.....209
一、实验数据的误差分析169	一、单因素实验的方差分析209
二、异常数据的处理171	二、双因素实验的方差分析213
三、随机变量的数字特征174	三、正交试验结果的极差分析及方差分析215
§ 7-2 实验数据的表示方法与经验公式的建立.....177	参考文献218
一、实验数据的表示方法177	附录1 国际标准 ISO3685-1977(E)《单刃车削刀具的寿命试验》219
二、图解法求经验公式178	附录2 常用正交表.....225
三、平均选点法求经验公式180	附录3 t 分布的双侧分位数.....229
四、最小二乘法求经验公式182	附录4 F 分布表.....230
五、重复试验时数据的处理183	

第一章 金属切削实验设计

§ 1-1 金属切削实验设计的任务与要求

金属切削实验技术是为金属切削加工技术的发展而服务的,因此实验技术是围绕着金属切削的主要内容而发展的。金属切削实验技术的发展特别是一些最新实验技术的应用,有力的促进并加速了整个金属切削理论和技术的发展。

金属切削的研究工作(不包括工艺方法)无论是车、铣、刨、钻、磨,主要是围绕着提高切削加工效率,延长刀具寿命,提高加工表面质量,发展自动化和自适应控制技术等方面进行的。要较好地研究解决上述问题,往往要从研究切削机理着手,都必须研究金属切削时的变形、切屑形成、切削力、切削热、刀具磨损、加工表面质量等问题,因此金属切削实验技术实际上就是研究金属切削过程中的金属变形、切削力、切削热、刀具磨损和耐用度、加工表面质量的实验技术。

金属切削的科学研究是为揭示切削过程中的物理变化的本质和规律,并有效地使用这些规律,达到提高切削效率和改善加工表面质量。研究的方法有理论分析研究和实验研究。由于金属切削是一个十分复杂的过程,切削过程中的各种物理现象,诸如力、热、刀具磨损,加工表面变质层等都以不同形式、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,理论分析研究极为复杂(例如切削区的应力场和温度场的分析计算、刀具和砂轮的磨损过程等),必须作很多的简化假设,理论分析计算所需的一些原始依据参数要靠实验提供,并且理论分析计算的最后结果仍需依靠实验结果来校验。现代金属切削科学研究,实际上相当大程度是建立在实验研究的基础上的,是依靠切削实验技术为基础的。

金属切削实验涉及面极广,所采用的手段也是多样的。随着实验技术的提高,各种现代化测试仪器和测试方法的应用,金属切削实验逐步从低级引向高级阶段,从静态观测转向动态观测,从宏观观测进入微观观测,从定性观测发展到定量观测,从考虑一个因素对切削过程的影响发展到考察多因素的综合影响。

金属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。

要进行科学实验,在实验前必先对实验作一设计。作为定义,实验设计技术是通过实验的方法,提高获得信息效率的一种技术。

一般来说,科学实验可以分为两类,一类是揭发所研究对象物理本质的研究实验,另一类是考察周围因素对所研究对象影响规律的研究实验。

对于第一类揭发研究对象物理本质的科学实验,我们着重考虑的是对某些性质所表示的

物理量的测定方法，例如在对切削温度的定量研究中，首先要考虑的是测定切削温度的方法，选择测温装置和仪器，要分析这些仪器的精度和灵敏度以及保持实验条件的恒定等。要根据研究任务的具体要求来选定实验方案，不仅要考虑技术的先进性和可行性，同时要考虑经济和现实可能性。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，则必须用电子探针或离子探针检测。实验结果有的可以拍照片，有时用记录仪绘出波形图或曲线，有时则给出读数或打印出数据，可根据实验要求选择。

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，试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作出合理的研究结论。要能正确选择实验方案和方法，必须对金属切削中常遇到的基本实验方法和实验仪器有基本的了解，这部分内容将在本书第二到第六章内分别介绍。

这类实验，实验技术的发展和提高，应贯彻精和准的提高。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，并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，而新的热象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，使金属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得到更深一层的揭露和认识。

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。这一方法在本章中将作较详细的介绍。

应该说明上述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、粘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（例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。随着研究工作的深入，研究实验的内容和性质将会有变化，这在实验设计时应予考虑。

§ 1-2 实验计划、实验大纲和实验报告的编写

一、实验计划

制订实验计划目的是对整个试验有全盘的考虑和安排。通常实验计划应包含下列工作项目，计划中的这些项目应有完成日期和负责人。

1. 调查研究、查阅资料

要明确课题的目的、意义和希望解决的问题。要围绕课题查阅收集国内外资料，调查有关工厂和研究单位，搞清现场情况和国内外这方面的研究情况，研究水平和存在的问题。明确

试验对象的特点和试验研究所具备的条件。应是在前人工作的基础上进行开发研究而不是重复前人已做过的工作。

2. 制订实验大纲

实验大纲应对主要研究的问题进行论述、确定实验方案、安排实验内容。实验大纲是整个科研工作进行的依据。

3. 实验条件的准备

根据实验大纲准备实验条件,包括试验仪器的准备和标定;专用试验装置和传感器的设计、制造、调试和标定;试件或试验材料的准备(包括材料成分化验和性能测试)、刀具和现场测试需用工具的准备。

4. 预试验

试验条件齐全后进行预试验,应按照正式试验的严格要求进行实验以便发现问题及时排除。对一些新的实验方案,可根据预实验的结果,调整修改实验计划,达到实验能正常进行。

5. 正式试验。

6. 数据处理。

7. 得到实验结果后进行验证实验。

8. 写实验总结并编写实验报告、印刷资料。

二、实验大纲

实验大纲是指导整个实验工作的依据,应包括如下各项内容。

1. 实验的目的和任务

常遇到的科学实验有机理研究、工艺性实验、新刀具新实验装置和仪器的研制、对比实验和检验性实验。

实验目的和任务,应确定实验内容、任务完成的形式、要求和指标。

2. 实验内容和实验方案

在调研和国内外资料查阅的基础上,确定实验内容和实验方案。不同的实验研究工作实验方法有很大不同。

机理性研究,如金属切削时的变形过程、加工表面的形成、刀具磨损和破损的机理等,不仅要分析采用已有的实验方法,同时还要考虑使用新的实验方法,研究各项新技术和新仪器使用的可能性。使用新实验方法或新试验仪器,常能在机理性研究中获得突破。

工艺性实验,如对材料加工性的研究、切削参数的优化、新刀具材料的切削性和耐用度试验、加工表面质量的改善等,这类实验可根据实际条件选用适当的实验方案。

新型刀具和新试验装置的研制,关键在于工作原理和结构方案的确定;看能否达到预期的性能指标。

对比实验和检验性实验由具体实验或检验要求决定。

科研实验大部分是在实验室内进行的,并且常在特定条件下进行的,因此实验得到的结论能否具有普遍性或适合生产使用,需要在实用条件下进行验证性实验。

3. 确定实验使用的仪器设备和切削试验用的刀具等。应写明对试验仪器和刀具性能的要求。

4. 实验设计和确定实验方法步骤

对于机理性研究可根据已确定的实验方案确定实验步骤、实验次数和实验参数的变化。

值。

对于优选切削参数、研究影响因素的规律等多因素多指标实验，应考虑正交实验设计，确定各因素各水平变化值、确定实验次数。

5. 实验数据的采集、记录和处理

要确定实验数据的采集、记录方法和使用的记录仪器。应根据数理统计的方法和要求列出实验数据的记录表格、计算公式等。如使用计算机进行处理，常将测试仪器的输出和计算机的接口相连。实验数据可以自动采集处理，使用预先编好程序的数据处理软件，直接打印出处理后实验结果数据。

6. 实验预期结果的精度分析

根据实验目的和要求，确定预期的精度，决定实验重复次数，决定记录纸长或磁带记录时间。

三、实验报告

实验报告是对实验数据进行归纳并上升到理性作出结论。实验报告可以总结经验、指导生产、提出问题、指明进一步研究的方向。实验报告一般包含下列内容。

- 1) 实验研究的目的和任务；
- 2) 实验方法和实验设计；
- 3) 实验条件和使用的仪器设备；
- 4) 实验结果的数据记录；
- 5) 数据处理方法和数据处理结果；
- 6) 实验结果分析和结论；
- 7) 存在问题和对进一步研究的意见建议；

8) 附录：典型的或重要的实验记录曲线、照片、数据处理表、实验得到的规律曲线、试验材料的分析试验原始记录，仪器和传感器的标定记录等。

§ 1-3 正交实验设计

一、有关的术语和符号

1. 试验指标

表征试验研究对象的指标称为试验指标，如要试验诸因素对切削力的影响，这时切削力数值的大小即为试验指标。

2. 因素

对试验指标可能会产生影响的因素（准备研究的）称为试验因素，因素用 1, 2, 3... 表示也可用 A, B, C ... 表示。例如可能会影响切削力的因素如切削深度 a_p 、进给量 f 、切削速度 v 、刀具前角 γ 等就是试验因素。试验因素有时是在研究工作开始时就给定的，有时则需研究后才选定的。

3. 水平

试验因素在试验中所选定的位级称为水平。例如上述切削试验中各因素均选 3 个水平，切深 a_{p1}, a_{p2}, a_{p3} ，进给量 f_1, f_2, f_3 ，切削速度 v_1, v_2, v_3 ，前角 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ 。这项试验中共有 4 个因素，每个因素都有三个水平，所以称为 3 水平 4 因素实验，简记为 3^4 型实验。

水平的表示符号为 1、2、3…，有时 2 水平符号采用 +1、-1 表示，3 水平符号采用 +1, 0, -1 表示。

二、实验设计方法的选择

一个科学的实验设计应做到以下两点：一是实验次数尽可能少；二是用这较少次数的实验数据，能作出有说服力的实验结论。

科学实验要解决的问题中，存在着要求得到研究对象受诸因素影响的关系规律问题，还有时要在某特定条件下优选最佳方案。如果变化因素只有一个，需要进行实验的次数不多，实验设计比较简单。在有两个变化因素时，采用全面试验法、双因素优选法或正交试验法将根据具体条件确定。在三因素及更多因素时，采用正交设计是进行实验设计的有效科学方法。

1. 单因素试验

其主要问题是水平数和各水平值应如何选取。可有下列不同情况

(1) 当试验因素和所研究对象的关系是线性时，理论上只要有二个试验点即可将关系曲线（或数学表达式）求出。但是为提高实验结果的可靠性，消除偶然误差，实验点数（即水平数）应增加到 3~4 个，并进行重复试验，各实验点的数据取平均值。

(2) 当试验因素和所研究对象的影响关系呈驼峰性时，要优选最佳点位置，单因素优选法有 0.618 法、分数法、对半法等。

(3) 单因素试验时为消除试验方法等的干扰，可采取分组试验法。例如研究某因素对切削力的影响规律时，为消除测力仪的影响，用两台测力仪重复同一实验；为消除试验材料不一致（同一牌号）造成的干扰，采用分组进行实验等。如何科学地设置区组，有一定的规律，但实际上这时考虑的变化因素实际上已不是单因素了。

2. 双因素试验时，当试验的水平数不多时，全面试验与正交试验区别不大。试验水平数较多时，采用正交试验法有一定优越性。

双因素时如需优选最佳方案，可有平行线法、交替法，调优法等；也可用正交试验法再用极差分析或方差分析来优选最佳方案。

3. 试验因素为 3 个或超过 3 个时

(1) 全面试验法 这试验法能把每个因素的各个水平一切组合的实验都做全。它对交互作用的分析最全面，但实验次数甚多，实际实施有一定困难。例如研究诸因素对切削力的影响，设试验因素为 4（切削深度 a_p 、进给量 f 、切削速度 v ，刀具前角 γ ），每个试验因素有三个水平，全面试验需做 $3^4 = 81$ 次试验，不仅实验需要大量人力物力，且很难保持全部实验条件一致。

(2) 过去切削试验用的部分实施法 为减少实验次数，适当牺牲某些效应，可采用部分实施。

过去切削实验用的部分实施法，以切削力实验为例，方法如下。设试验因素 4 个（ a_p ， f ， v ， γ ），每因素各有三个水平（以下角标 1、2、3 表示）。实验分 4 组进行。每组实验只有一个因素变化三个水平，而其他三个因素固定不变（假设固定下角标为 2 者）。

第 1 组实验，固定 f_2 、 v_2 、 γ_2 ，试验 a_{p1} 、 a_{p2} 、 a_{p3} 时的切削力；

第 2 组实验，固定 a_{p2} 、 v_2 、 γ_2 ，试验 f_1 、 f_2 、 f_3 时的切削力；

第 3 组实验，固定 a_{p2} 、 f_2 、 γ_2 ，试验 v_1 、 v_2 、 v_3 时的切削力；

第4组实验, 固定 a_{p2} , f_2 , v_2 , 试验 γ_1 , γ_2 , γ_3 时的切削力。

共做 12 次实验 (未考虑重复试验), 经数据处理后可得到切削力影响因素的公式。分析上述部分实施试验法可知, 它没有考虑各因素间的相互作用, 实验时固定因素的取值 (如 a_{p2} , f_2 , v_2 , γ_2) 是主观确定 (或随机的), 这和实际情况并不相符, 因此实验结果的精度就较低。

(3) 部分实施的优越性 采用部分实施减少实验次数后是否会漏掉使指标达到最优化的水平组合, 这是一个要研究的问题。

当部分实施的样本是随机选取时, 这问题可根据抽样理论来分析, 在二分之一实施时, 如全面实验共要做 81 次实验, 部分实施做 41 次实验, 部分实施样本的第 1 名位于总体的前 2 名; 在四分之一实施时, 如部分实施做 21 次实验, 样本的第 1 名位于总体的前 4 名; 如部分实施和 12 次实验, 则样本的第 1 名位于总体的前 7 名。因此随机选取样本, 部分实施的实验次数较少时, 实验结果不会很好。

(4) 正交实验设计法 这也是一种减少实验次数的部分实施法, 实验样本的选取不是随机的, 而是按正交表来选取和安排实验, 使实验中每一因素的不同水平的实验次数相同, 且和不同因素的各水平相遇机率相等。由于这特点, 用正交表安排的实验方案是有代表性的, 能够比较全面地反映各因素各水平对试验指标影响的大致情况。因此用正交实验设计的实验次数虽然减少了, 但仍能得到比较精确的实验结果。以前面讲过的切削力实验为例, 三水平四因素的正交表 $L_9(3^4)$ 查得只需做 9 次试验, 实验按正交表要求去做, 显然这要比过去切削实验中部分实施做 12 次实验, 结果将更为精确。因此在多因素试验时, 应尽可能使用正交实验设计法。

三、正交表和正交实验设计法

1. 正交实验法要解决的问题

正交实验法是在实验经验与理论分析的基础上, 利用现成的规格化的“正交表”, 科学地选取试验样本, 合理安排实验。它在很多的试验条件中选出代表性强的少数次条件, 并通过少数次的实验, 找出符合客观规律的实验结论或优选出好的方案。

正交实验设计还有相应的科学地分析实验结果的方法。通过正交试验和相应的实验结果分析, 可得到

(1) 分清影响试验指标诸因素的主次关系, 可找出起主要作用的因素和影响较小的因素。

(2) 找出各因素的水平高低对试验指标的影响规律, 可明确哪个因素的水平影响大, 哪个水平的影响小。

(3) 在因素和水平的不同搭配中, 找出好的组合方案。

2. 正交表

正交表是正交实验设计的核心, 应对它有必要的了解。

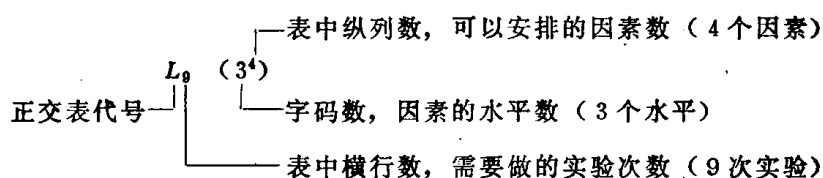
正交表是由代表因素和水平的数字组成的、具有数学性质的表格。正交表很多, 常用的二水平正交表有 $L_4(2^3)$, $L_8(2^7)$, $L_{12}(2^{11})$, $L_{16}(2^{15})$ 等; 三水平正交表有 $L_9(3^4)$, $L_{18}(3^7)$, $L_{27}(3^{13})$ 等; 四水平正交表有 $L_{16}(4^5)$ 等。现以 $L_9(3^4)$ 正交表为例来说明它的性质和使用。 $L_9(3^4)$ 正交表如表 1-1 所示。

$L_9(3^4)$ 正交表有 9 个横行, 表示要进行 9 次实验; 有 4 个纵列, 表示可以安排 4 个因

表1-1 $L_9(3^4)$ 正交表

试验号 \ 列号	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

素，水平 1、2、3 表示三个不同水平。从这正交表的组成，可看到正交表的符号 $L_9(3^4)$ 的意义如下



上述正交表有两个基本性质

(1) 每纵列（因素）中，不同数字（水平）出现的次数相同，1、2、3 都是出现 3 次；

(2) 任意两个纵列其横向形成 9 个数字对 (1, 1)、(1, 2)、(1, 3)、(2, 1)、(2, 2)、(2, 3)、(3, 1)、(3, 2)、(3, 3) 出现的次数相同，都是一次，即任意两纵列的字码 1、2、3 间搭配是均衡的，这就是正交表“正交性”的含义。

有些实验各因素的水平不一定相同，例如有的因素两个水平，有的因素 3 个或 4 个水平，这类实验就要用混合水平的正交表来安排。混合正交表有多种，如 $L_8(4^1 \times 2^4)$ 、 $L_{12}(3^1 \times 2^4)$ 、 $L_{16}(4^1 \times 2^3)$ 、 $L_{16}(4^3 \times 2^6)$ 等。现以 $L_8(4^1 \times 2^4)$ 为例说明它的特点。这正交表见表 1-2。

表1-2 $L_8(4^1 \times 2^3)$ 正交表

试验号 \ 列号	1	2	3	4	5
1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2
3	1	2	3	1	2
4	1	2	4	2	1
5	2	1	3	2	1
6	2	1	4	1	2
7	2	2	1	2	2
8	2	2	2	1	1

上述正交表可安排 5 个因素，其中 1 个因素 4 个水平，4 个因素是 2 个水平，共需要进行 8 次实验。表中任意两列都是均衡搭配的。

附录2中给出了若干种常用的正交表，可以按需要选用。

3. 用正交表安排实验

根据实验目的，确定试验指标，然后确定影响试验指标的主要因素和选取各因素的水平，最后应列出因素水平表。以三水平三因素的切削力试验为例，列出因素水平表如表1-3所示。

表1-3 切削力试验因素水平表

水 平 \ 因 素	1. 切深 a_p (mm)	2. 进给量 f (mm/r)	3. 切削速度 v (m/min)
水平 1	a_{p1} 0.5	f_1 0.1	v_1 40
水平 2	a_{p2} 1.5	f_2 0.2	v_2 80
水平 3	a_{p3} 3.0	f_3 0.3	v_3 120

列好因素水平表后，就要选择合适的正交表来安排实验。这是一个三因素三水平实验，应该从三水平正交表 $L_9(3^4)$ 、 $L_{18}(3^7)$ 或 $L_{27}(3^{13})$ 中选用。这三个正交表都可安排四个因素，需做实验次数分别为 9，18，27 次，我们希望少做实验，所以选 $L_9(3^4)$ 正交表。

用正交表安排实验水平的具体过程如下：

(1) 排表头 按因素水平表中三个因素的次序，1. 切削深度 a_p ，2. 进给量 f ，3. 切削速度 v 顺序的放到 $L_9(3^4)$ 上方的三个纵列上，每列设一个因素，第 4 列没有因素可以取消。

(2) 各因素水平对号入座，得出试验方案表如表 1-4 所示。

表1-4 切削力试验方案表

试验号 \ 因 素	1. 切削深度 a_p	2. 进给量 f	3. 切削速度 v	切 削 力
1	0.5	0.1	40	
2	0.5	0.2	80	
3	0.5	0.3	120	
4	1.5	0.1	80	
5	1.5	0.2	120	
6	1.5	0.3	40	
7	3	0.1	120	
8	3	0.2	40	
9	3	0.3	80	

(3) 得到试验方案表后，即可进行试验，测出切削力后填入表内。

(4) 对实验测得的数据进行数据处理，进行极差分析或方差分析，进行回归分析求出切削力指数公式。实验结果的数据处理将在第七章内讲述。

§ 1-4 回归的正交设计

正交实验设计是用正交表安排实验，可用较少次数的实验达到较好的实验效果。正交实验设计时各因素的水平值如选取合适，可使实验数据处理的回归分析大为简化，这是回归正交设计要研究解决的问题。按照回归模型的次数，回归设计又分为一次回归设计和二次回归

设计等。限于篇幅，本章只讨论一次回归的正交设计。

一次回归的正交设计主要运用二水平正交表 $L_n(2^k)$ 类正交表，如 $L_4(2^3)$ ， $L_8(2^7)$ ， $L_{12}(2^{11})$ 等来安排实验。

一次回归用于线性函数，其数学模型是

$$y = \sum_{j=0}^P \beta_j Z_j + \varepsilon$$

其中 Z_0 恒等于 1。有些非线性函数（如带指数的函数）可以适当变换而成线性函数，可用一次回归进行分析，使计算大为简化。

在进行回归正交设计时，为使计算简化，常进行一些换算处理，步骤如下

1. 确定各因素的变化范围，即确定各因素的上下水平值

这主要是用专业知识大致确定变化范围，特别是对自变量更为重要。例如试验切削速度对刀具耐用的关系时，不同刀具材料（高速钢，硬质合金，超硬材料等）应采用的试验速度范围上下限应不相同，试验者应根据专业知识来决定。

2. 对每个因素的水平进行编码，即作线性变换

将原二水平正交表中的上下水平 1，2 更换成 +1、-1，三水平的正交表中的水平 1，2，3 更换成 +1、0、-1。下面是 $L_8(2^7)$ 和 $L_9(3^4)$ 正交表经编码变换后的正交表（表 1-5，1-6）。

表1-5 $L_8(2^7)$ 正交表

列号 试验号	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	-1	-1	-1	-1
3	1	-1	-1	1	1	-1	-1
4	1	-1	-1	-1	-1	1	1
5	-1	1	-1	1	-1	1	-1
6	-1	1	-1	-1	1	-1	1
7	-1	-1	1	1	-1	-1	1
8	-1	-1	1	-1	1	1	-1

表1-6 $L_9(3^4)$ 正交表

列号 试验号	1	2	3	4
1	-1	-1	-1	-1
2	-1	0	0	0
3	-1	+1	+1	+1
4	0	-1	0	+1
5	0	0	+1	-1
6	0	+1	-1	0
7	+1	-1	+1	0
8	+1	0	-1	+1
9	+1	+1	0	-1

用编码后的正交表编制的试验计划, 可使回归计算简化。

对实验中各因素水平值的编码方法如下。设因素 z_j 试验时的上下水平为 z_{1j} 和 z_{2j} , 零水平 z_{0j} 为它们的算术平均值

$$z_{0j} = \frac{z_{1j} + z_{2j}}{2}$$

它们差的一半

$$\Delta_j = \frac{z_{2j} - z_{1j}}{2}$$

编码就是对因素的水平值作如下线性变换

$$x_j = \frac{z_j - z_{0j}}{\Delta_j} = \frac{2(z_j - z_{0j})}{z_{2j} - z_{1j}} + 1$$

这就建立了因素 z_j 和 x_j 取值的对应关系。现以实例说明编码过程。

设某因素 z_2 的上水平为 4.5, 下水平为 2.5, 求编码后的上水平和下水平。 x_2 的上下水平为

$$x_{12}(\text{上}) = \frac{2(4.5 - 2.5)}{4.5 - 2.5} + 1 = 1$$

$$x_{22}(\text{下}) = \frac{2(2.5 - 4.5)}{4.5 - 2.5} + 1 = -1$$

只有上下水平的实验计划表是不够的, 因为两点之间必然能连成直线。这样回归出来的直线, 能否在研究区域内部良好吻合, 无法知道, 因此需要增加一个实验点, 成为三水平实验。增加的点应正好在 +1 和 -1 的中点, 其坐标为零, 称为零坐标实验点。零坐标实验点的坐标为 0, 0..., 它不参与拟合回归方程, 不会影响各回归系数的值。

上例中如要实验三个水平, 中间水平必须处在上下水平的中间, 为零水平。

$$x_{02}(\text{零}) = 0$$

$$z_{02} = \frac{4.5 + 2.5}{2} = 3.5$$

某些非线性函数可变换成线性函数, 使回归计算简化。例如切削试验时常要建立切削力公式

$$F_s = c_s a_p^x f^y$$

此公式为非线性函数, 将两边取对数, 转化成线性函数

$$\lg F_s = \lg c_s + x \lg a_p + y \lg f$$

或

$$x = b_0 + b_1 z_1 + b_2 z_2$$

现以 z_2 为例进行编码如下

设 f 的上水平为 0.4 mm/r, 下水平 0.1 mm/r, 则

$$x_{12}(\text{上}) = \frac{2(\lg 0.4 - \lg 0.1)}{\lg 0.4 - \lg 0.1} + 1 = +1$$

$$x_{22}(\text{下}) = \frac{2(\lg 0.1 - \lg 0.4)}{\lg 0.4 - \lg 0.1} + 1 = -1$$

还要加一个零水平, 其进给量为 f_{02}

$$x_{02} = 0$$

$$\lg f_{0.2} = \frac{1}{2} (\lg 0.4 + \lg 0.1)$$

故

$$f_{0.2} = \sqrt{0.4 \times 0.1} = 0.2 \text{ mm/r}$$

对四水平实验, 要使实验点上、下对称, 可使编码后成为 + 3、+ 1、- 1、- 3; 五水平时可编码成为 + 2、+ 1、0、- 1、- 2。

回归正交设计的实验结果的回归分析, 可按第七章所讲述内容进行。

§ 1-5 计算机辅助切削试验数据采集与处理

随着计算机的普及应用, 切削试验数据的采集和处理愈来愈多的使用计算机。使用计算机后, 可以在进行切削试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, 及时做补充试验。采用微机切削试验数据采集处理系统不仅可以大大节省处理切削试验数据所需时间, 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。

现在切削实验中用的计算机辅助切削实验数据的采集处理系统, 从硬件到软件都有多种不同方案。本章将介绍实验信号数据的采集问题和两种实用的微机切削实验数据采集系统, 关于数据处理方法, 现在由于计算机的使用, 一些更精确更完善的处理方法使用日多, 这部分内容将在第七章介绍。

一、实验信号的分析与采样

1. 实验信号的分析

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。将上述被测的物理量转换成易于测量的电信号的方法将在第二章到第六章内讲述。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器绘出波形图。使用计算机进行信号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信号和非确定性(随机)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性信号, 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, 直接对其时间函数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(随机信号)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。

切削试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。

2. 实验信号的采样

在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 Δt (或采样频率 f_s)和量化时的幅值增量 Δx 。

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

采样间距 Δt 应取得适当,若 Δt 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 Δt 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1-1中,有三种不同频率的正弦信号,在各采样点上三者的瞬时值完全对应相等,因此采样后可看成相应的低频分量,三者没有差别。

根据采样定理,要确认一个正弦信号的频率,至少要对信号作每周期两次以上的采样,即采样频率 $f_s = \frac{1}{\Delta t}$ 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

它分量,将被错认为相应的低频分量。频率 $f_s = \frac{1}{2}f_s$ 称为折叠频率,可以证明任何一个大于折叠频率的高频成分 f_s 都将和其低频成分相混淆,即“折叠”到低频范围中去,歪曲了真实的幅值频谱和功率谱密度。

频混是由于采样频率不够高所引起的,解决的办法有:(1)选用足够大的采样频率 f_s ,使不存在高于 $f_s = \frac{1}{2}f_s$ 的频率成分,例如实验中虽然感兴趣的频率分量是低于1000 Hz,但

估计信号中包含有5000 Hz以下的频率分量,为防止频混应选用采样频率 $f_s = 2 \times 5000 \text{ Hz}$;

(2)在采样之前,先采用低通滤波器来衰减不感兴趣的高频分量,然后根据滤波器的选择性来确定合适的采样频率。这种低通滤波器称为抗频混滤波器,采用抗频混低通滤波器后,高频分量的幅值将受到衰减,如采样频率选择适当,频混现象可以大为减弱,甚至没有实际影响。

因为没有陡峭截止特性的低通滤波器,采样频率 f_s 应选得大于 $2f$,此外还要加宽频带和相位滞后等问题,因此实际上采样频率 f_s 常取 $2.5 \sim 3.5 f$ 。

抗频混滤波器对减少采样点和计算工作量能起很大作用,例如需处理持续1 s即包含5000 Hz以下频率分量的某信号,如仅对1000 Hz以下频率感兴趣,不用抗频混滤波器时,

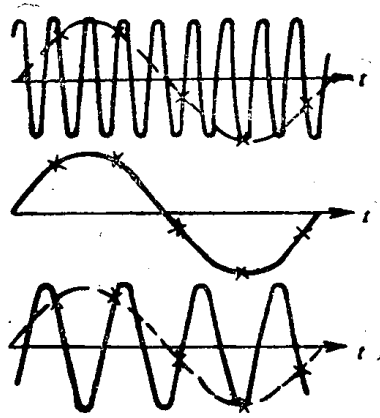


图1-1 频混现象