

普通高等教育机电类规划教材

汽车拖拉机试验学

(第2版)

吉林工业大学 李杰敏 主编

机械工业出版社

普通高等教育机电类规划教材

汽车拖拉机试验学

(第 2 版)

主编 李杰敏

参编 王志浩 王占岐

王荣本 刘明树

主审 卫修敬



机械工业出版社

再 版 前 言

本书是1981年第1版的修订本。本书第1版的主编为邬惠乐、邱毓强，编写者有邬惠乐、邱毓强、陈德宜、郁工瑞、李杰敏、胡子正。本书一直作为各高等院校汽车与拖拉机专业的教材。通过多年教学实践，各校师生对本书提出了许多宝贵意见，普遍认为原书内容丰富，并照顾到本科生、研究生及社会各方面的需要，字数达到了65万字左右，是一本较好的测试技术方面的教材。但汽车拖拉机试验学是本专业本科生的必修课，教学时数一般仅有30~40学时左右，所以过去教学中只是根据各校具体情况从其中选取一部分内容讲授，其范围和深度均难以掌握，给教学带来一定的难度，不能形成完整的体系和主导思想。另外，随着高新技术的发展和应用，汽车拖拉机试验技术进入了一个新的发展阶段，使我们感到有必要删减原书中过多的篇幅，更新完善其内容，以适应本科生教学的需要。

根据全国高等工业学校“汽车与拖拉机专业教学指导委员会”提出的要求，本书的主要使用对象是汽车与拖拉机专业的本科生，适用于40学时的教学内容，并可供研究生及有关工程技术人员参考。因此，《汽车拖拉机试验学》（第2版）按照基本、常用、成熟和必需的原则，删去了原书的第三篇，对第一篇也进行了大量删减和改写，如相似理论和正交试验设计等内容均已删去；对第二、四篇进行了大量改写和补充，并增添了测试装置的技术特性和微机在测试技术中的应用等反映现代测试技术的有关章节。编写中努力贯彻少而精和理论联系实际的原则，对于汽车拖拉机各项性能和可靠性试验的内容，在汽车拖拉机理论和设计课中已作介绍，所以本书仅列举一些汽车拖拉机典型应用实例来说明试验理论和方法。为了使学生掌握每章的基本内容，各章还增添了习题。

本书共分九章：概论，测试装置的技术特性，传感器，信号的中间变换与传输，记录仪器，微机在测试技术中的应用，测量误差分析，静态测量数据处理以及动态测量数据处理。学生必须在学过电工基础，微机原理，概率论与数理统计、积分变换等工程数学的基础上来学这门课程。

本书第2版由吉林工业大学李杰敏教授主编，并编写第一章、第二章，刘明树讲师（博士）编写第三章的第一、二节和第七章，王志浩副教授编写第四章、第五章，王荣本副教授编写第三章的第三、四、五、六、七节及第六章，王占岐副教授编写第八、九章。

本书承江苏理工大学卫修敬副教授再次担任主审，对全书进行了详细审校，给予充分肯定，并提出了许多中肯和宝贵的意见及建议，编者在此谨表示诚挚的谢意。本书在编写过程中还得到许多兄弟院校、工厂和研究所的大力支持和帮助，在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平所限，书中错漏和不妥之处在所难免，诚恳地欢迎广大读者提出批评指正。

编者

1994年2月

目 录

再版前言

第一章 概论	1
第一节 汽车拖拉机试验概况	1
第二节 汽车拖拉机试验的分类与特点	2
第三节 汽车拖拉机试验计划与组织	3
第四节 本课程研究的对象和学习方法	5
第二章 测试装置的技术特性	6
第一节 测试的基本概念	6
第二节 测试装置的静态特性	7
第三节 测试装置的动态特性	9
第四节 测试装置在典型输入下的动态响应	18
第五节 实现不失真测试的条件	23
第六节 测试装置动态特性的测定	25
习题	26
第三章 传感器	29
第一节 电阻应变片式传感器	29
第二节 电感式传感器	36
第三节 电容式传感器	39
第四节 压电式传感器	42
第五节 磁电式传感器	44
第六节 光电式传感器	47
第七节 热电式传感器	49
习题	51
第四章 信号的中间变换与传输	52
第一节 电桥	52
第二节 滤波器	60
第三节 放大器	66
第四节 调制与解调	68
第五节 测量信号的传输	75
习题	79
第五章 记录仪器	81

第一节 电位计式记录仪	81
第二节 检流计式记录仪	82
第三节 磁带记录器	86
习题	90
第六章 微机在测试技术中的应用	91
第一节 微机测试技术基础	91
第二节 单通道信号测试系统	101
第三节 多通道信号测试系统	110
第四节 D/A 控制程序设计	118
第五节 综合应用实例	119
习题	124
第七章 测量误差分析	125
第一节 误差的基本概念	125
第二节 随机误差	127
第三节 系统误差	133
第四节 异常数据的取舍	137
第五节 等精密度直接测量参数测定值的处理步骤	138
第六节 间接测量参数(函数)的误差分析	140
习题	143
第八章 静态测量数据处理	144
第一节 试验数据结果的表达	144
第二节 回归分析与曲线拟合	147
习题	156
第九章 动态测量数据处理	158
第一节 试验数据处理概述	158
第二节 试验数据的时域分析与处理	166
第三节 试验数据的幅值域分析与处理	172
第四节 试验数据的频域分析与处理	174
习题	195
参考文献	196

第一章 概 论

第一节 汽车拖拉机试验概况

汽车拖拉机试验是伴随其工业的建立和发展而逐渐成长起来的,汽车拖拉机工业发展到今天的水平与其试验研究工作是分不开的。汽车拖拉机的使用条件复杂,对产品的性能、寿命、质量和成本等方面要求高,影响产品质量的因素多,所涉及的技术领域也极为广泛,因而对一些问题的研究还不够充分。技术上许多新的发现和突破以及新设计的或是现生产的产品,即使在设计和制造上考虑得非常周密,也都必须以试验测试为基础经过试验来检验。试验是帮助我们深入了解汽车拖拉机在实际使用中各种现象的本质及其规律,并推动其技术进步的一种极为重要的方法。它是保证产品性能,提高产品质量和市场竞争力的重要手段。因此,近年来汽车拖拉机工业企业非常重视其试验研究工作,在产品技术领域设立专门的试验研究机构。

汽车拖拉机工业是20世纪初形成的。早期的汽车拖拉机沿袭了马车的基本布置和结构,用手工方式进行生产,产品数量不多,性能不高而且成本高昂。1893年,美国人亨利·福特制成了第一辆装用小型汽油机的四轮车。1913年,建成全世界第一条汽车总装生产流水线,使劳动生产率显著提高,成本下降,产量增加,并扩大了使用范围。20世纪初至40年代,汽车拖拉机工业采用了大规模生产技术及流水生产线。这时产品的可靠性、寿命和性能方面的问题较突出,要求通过试验研究工作加以解决。为了适应汽车拖拉机高质量、低售价的需要,各厂家进行了大量的有关材料、工艺、可靠性、寿命以及性能等诸方面问题的试验研究。由于专业化和协作生产的需要,也进行了制定各种标准、规范的研究工作,其中包括试验方法标准的制定。这期间的试验技术除借用其它行业比较成熟的方法外,也逐渐形成汽车拖拉机行业自己的试验方法和试验设备,如转鼓试验台、闭式试验台及疲劳试验台等,这些设备除结构和控制方面有所改进外,其基本原理沿用至今。此外,道路试验得到了充分的重视,成为汽车拖拉机试验的基本方法之一。同时也出现了早期的汽车拖拉机试验场。早期的汽车拖拉机试验,虽然规模不大,范围不广,仪器设备比较简单,除个别厂家有试验场外,试验工作主要在试验台架和一般道路上进行,但汽车拖拉机试验工作的基本方法是在这段时间形成的,并为以后试验技术的发展打下良好的基础。

第二次世界大战以后至20世纪70年代,全世界汽车拖拉机保有量剧增,在其结构和性能方面有大幅度的改善和提高。这一时期汽车拖拉机工业的主要特点是,既保持着大规模生产,又有向多品种和高技术发展的趋势。由于汽车拖拉机生产发展的需要,同时也是许多相邻工业、相邻学科的发展和渗透的结果,汽车拖拉机试验技术进入了一个新的发展时期。大量的基础性研究工作推动了试验技术的发展。

试验技术的发展与试验仪器设备的完善和提高有密切关系。由于电子技术的发展,出现各种数据采集、变换、放大、贮存、处理以及控制等方面的高精度电子仪器。电测量测试

技术的应用在现代汽车拖拉机试验中占有十分重要的地位。

汽车拖拉机工业发展到20世纪70年代以后,不仅保持大规模、多品种和高技术,而且出现一些新的更科学、更合理的生产组织管理制度,使汽车拖拉机制造业能够大规模地生产高质量、低售价的产品。同时,试验技术也得到了同步的提高与发展,高技术的应用愈来愈多。特别是电子技术的高度发展,电子计算机的应用对汽车拖拉机试验也起到了巨大的促进作用。电子计算机在汽车拖拉机的性能预测、强度计算上提供了快速、准确的运算工具,如操纵稳定性、空气动力学特性、车身以及车架的有限元计算等,从而代替了大量多方案比较试验。电子计算机既是计算工具,也是试验手段。

此外,电子液压振动试验台、电控转鼓试验台等大型先进试验设备的广泛采用,以及现代化风洞、试验场等大型试验设施的普遍建立,使汽车拖拉机试验技术无论在方法上或装备上都达到了空前完善的程度。

建国以来,随着我国汽车拖拉机工业的建立和发展,汽车拖拉机试验也随之从无到有,从小到大,从学习国外经验到创立自己的试验方法标准以及在建立自己的试验基地方面都进行了大量工作。1950年国家重工业部就成立了汽车工业筹备组,筹备组建立了汽车实验室,开展试验研究工作。1954年发展成为汽车拖拉机研究所。1957年分别成立了部属长春汽车研究所,洛阳拖拉机研究所。经过30多年的工作,中国汽车拖拉机行业的科研机构有很大发展,仅汽车及汽车零部件研究单位就有40多个,初步形成了汽车拖拉机行业的科研试验体系。近年来我国已建成海南汽车试验场等三个试验场,还有些试验场正在筹建中。围绕国产汽车拖拉机的生产,开展了大量的性能、强度和寿命方面的试验,进行制定试验方法国家标准的研究,还进行了许多基础性研究工作,如路面谱、载荷谱、车辆地面力学以及操纵稳定性等。在试验基地建设上,除积极引进国外先进试验设备外,还研制了许多具有自己特点的、适用的试验仪器设备,出现了一些专门生产汽车拖拉机试验仪器设备的工厂企业,为汽车拖拉机工业的发展及其试验水平的提高创造了有利条件。现有汽车拖拉机工业企业中均设有试验研究机构,国家还成立了一些汽车研究所和拖拉机研究所,专门从事汽车拖拉机重大课题的试验研究。此外,有关高等学校在培养汽车与拖拉机专业人才的同时,也开展了许多试验研究工作。

第二节 汽车拖拉机试验的分类与特点

汽车拖拉机的试验研究内容很广,解决的问题也极为复杂,试验研究已发展成为独立的科学技术部门。大型工厂都有试验研究中心或研究所和综合性试验场,采用先进的测试技术,电子计算机控制试验过程和数据处理系统,大大提高了试验工作的效率和水平。

汽车拖拉机试验可按其试验目的、试验对象和试验方法进行分类。

一、按试验目的分类

(1) 质量检查试验 对目前生产的汽车拖拉机产品,定期进行质量检查试验,鉴定产品质量的稳定性。为及时检查出产品存在的问题,一般情况下试验较简单,通常是针对用户意见进行检查,并作出检查结论。一般每种产品都有具体的试验规范,如GB1333—77《汽车产品质量定期检查试验规程》。

(2) 新产品定型试验 在新型汽车或拖拉机投产以前,首先按规程进行全面性试验,以

时在不同地区（如我国华南亚热带、西藏高原、东北寒区等）进行适应性和使用性试验。在定型试验中，不允许出现重大损坏、性能恶化及维修频繁等情况。新设计或改进设计的试制样车，则应根据其生产纲领规定试验内容。大批量生产的车型，可先以小量（3~8辆）样车考验其设计性能，经改进后，再生产小批量（20辆左右）样车考验其性能、材料与工艺等。

（3）科研性试验 为了改进现有产品或开发研制新产品，必须对车辆的新部件、新结构，采用的新材料、新工艺等进行广泛深入地研究试验，试验常采用较先进的仪器设备。此外，新的试验方法与测试技术的探讨，试验标准的制定，也是科研性试验的一部分。

二、按试验对象分类

（1）整车试验 试验目的是考核评定整车的的主要技术性能，测出各项技术性能指标，如动力性、经济性、平顺性、制动性及通过性等。此外，整车基本参数的测定也包括在内。

（2）机构及总成试验 该试验主要考核机构及总成的工作性能和耐久性，如发动机功率、变速器效率、悬挂装置的特性以及它们的结构强度、疲劳寿命和耐久性。

（3）零部件试验 该试验主要考核其设计和工艺的合理性，测试其刚度、强度、磨损和疲劳寿命以及研究材料的选用是否合适。

三、按试验方法分类

（1）室内台架试验 该试验能以较高的精度在室内试验台上测试汽车拖拉机整车及总成和零部件，并能消除不需研究的某些因素，容易控制试验条件。近10年来，在台架试验中也广泛采用电子计算机技术。例如室内台架试验，广泛应用计算机控制，随机负荷加载以及自动分析记录的数据采集系统。因此，室内台架试验可以模拟实际使用工况，建立起室内台架试验与实际道路试验相应的关系，以代替一部分道路试验，这样不仅提高了试验精度，而且缩短了试验周期。

（2）室外道路与田间试验 汽车拖拉机在实际使用的道路或田间条件下现场试验，其试验结果比较符合实际使用情况，可全面考核其技术性能，所以这是应用最普遍的方法。但试验的影响因素多，如条件环境不易控制，受车上空间条件的限制，使传感器的安装及测试参数的记录、处理均较室内试验困难。近10年已陆续发展了各种高性能的小型传感器和电子仪器以及应用磁带记录器作现场记录。此外，还发展了遥测系统，使道路或田间试验技术更趋完善。

（3）试验场试验 该试验按预先制定的试验项目、规范，在规定的行驶条件下进行。试验场可设置比实际道路更恶劣的行驶条件和各种典型道路与环境，在这种条件下进行可靠性试验、寿命试验及环境试验，也可以进行强化试验以缩短试验周期，提高试验结果的可比性。

第三节 汽车拖拉机试验计划与组织

汽车拖拉机试验是一项技术性较强的工作，必须周密计划与组织。试验过程可分为试验准备、试验实施和试验总结三个阶段。

一、试验准备阶段

1. 制定试验大纲

试验大纲是指导试验的重要技术文件，它关系到试验的好坏与成败。根据汽车拖拉机试

验任务提出的要求，按相应的国家试验标准编制试验大纲，经讨论、审批后实施。

试验大纲包括下列内容：

(1) 试验目的和任务 明确规定试验必须完成的 任务(如解决的技术问题、测取的数据及观察的现象等)以及要求达到的目的。试验的目的决定了试验的类型、试验的规模与内容。

(2) 试验内容与条件 为了完成试验任务所需的试验内容、试验程序以及试验工作量，对每项试验内容和条件应作简要说明，必要时应附有试验原理图。

(3) 试验项目和测量参数 大纲中应根据试验内容，详细列出必须进行的试验项目和每个项目中必须测量的参数，并说明由测量参数求得最后性能指标的方法，附必要的计算公式。

(4) 试验仪器 根据试验项目和测量参数，选择试验仪器设备，并提出其精度要求。

(5) 试验技术和方法 大纲中规定的试验有关技术事项和试验的方法和步骤，对试验人员的正确操作、检测数据及确保试验成功是十分重要的。特别要遵守标准的或法规规定的试验程序和方法。

(6) 人员组织和分工 参加试验人员按专业水平和工作需要进行分工，使每个人都有明确的职责，组成试验组织系统。

(7) 试验进度计划 根据试验任务和目的以及各个项目进行的次序，确定进度日程计划，以便使试验工作协调和有计划地进行。

2. 仪器设备准备

根据试验大纲要求，准备好所需仪器设备。例如对整车试验，则应准备好各种传感器和记录仪器等。对室内台架试验，则要准备好各种辅助支架、连接件、测量仪器、动力设备以及测功设备等。所有测试仪器与设备都应满足试验的测量范围、容量和精度的要求。试验前应对各种传感器、测试仪器进行定度，定度的数据应记录并填入试验报告中。

3. 人员配备和记录表格准备

根据试验项目和测试数据，配备参加试验人员，明确每人的任务和相互间的配合，熟练掌握仪器设备的操作方法，并拟定试验记录表格和数据处理表格。对自动打印或记录的测试系统，要设计好打印格式、记录图形的方式与规格。

二、试验实施阶段

试验实施阶段一般经历以下几个过程：起动预热、工况监测、采样读数和校核数据。

不论是整车试验还是总成、部件试验，除另有规定外(如汽车冷起动)，都必须经过起动预热过程，使试验设备和被试车辆或总成都达到正常工作状态，一般负荷由小到大，转速由低到高进行试验。试验进行中，必须随时监测车辆和设备的运转工况(如发动机水温、机油温度等)，检查测试仪器的工作状况。按试验大纲规定，在指定工况下采样读数和记录。在稳态试验中，要读取或记录在一定时间内的稳定值。在动态瞬时试验中，要使被试件的动作和记录同步。如采用自动采样记录系统，可快速记录大量数据，并由计算机计算出所需要的参数，画出关系曲线或图形。在试验结束后，应立即汇总主要测试数据，检查、校核各参数测定值，及时作出试验是否有效的判断。若发现数据遗漏、偏差过大或数据互相矛盾，明显不合理，则要分析原因，采取改进措施，重新进行试验。

在试验实施中，必须遵守下列原则：

- 1) 试验现场不得临时改变项目或内容, 以避免考虑不周、准备不足而发生意外事故。
- 2) 试验中发现车辆、设备及仪器出现故障, 应停止试验, 进行检修。
- 3) 试验大纲中规定的允许最大负荷、最高转速、最大压力及最大车速等极限值, 试验人员应明确, 任何情况下不得超过。
- 4) 测试数据应随时观察, 及时汇总处理, 发现问题及时在试验中解决。
- 5) 试验中, 对确保人身安全必须作出明确规定, 同时还要采取相应的安全措施。

三、试验总结阶段

试验完成后的总结工作, 包括对试验中观察到的现象和发现的问题进行定性的分析研究; 对测得的数据进行处理, 获取必要的信息和参数, 以确定实测所得的性能指标和参数间的关系; 在强度、疲劳及磨损试验完毕后, 对试件的损坏情况进行分析、检查与测量, 取得必要的试验数据。在完成上述工作后, 对试验数据和资料再进一步归纳上升至理论高度, 得出规律, 对被试件作出评价, 并作出结论, 写出试验报告。

试验报告内容一般包括: ①问题的提出和简要测试方案。②试验条件描述, 如地面状况、测试工况、气温、风向和风速等。它便于试验结果比较和应用结果时参考。③试验方案设计与试验方法。④测试系统仪器选配。⑤传感器定度。⑥数据处理方法、处理结果与误差范围。⑦试验结果分析。⑧结论。⑨存在问题和进一步的改进意见。⑩附录, 如典型试验记录曲线、数据处理结果表、试验规律曲线及工况照片等。

第四节 本课程研究的对象和学习方法

本课程研究的对象是汽车拖拉机试验中测试系统的静、动态特性。静、动态测试中的常用传感器特性和与之匹配的测量电路及记录仪器的结构与工作原理。电子计算机在测试系统中的应用。测试信号的分析和数据处理方法。

汽车拖拉机试验学是研究试验规律、试验方法和测量技术的科学, 是实验工程学的一部分。现代科学技术研究包括理论与试验研究, 对汽车拖拉机工程科技人才而言, 除了要掌握专业理论知识外, 还应有从事试验研究的能力。汽车拖拉机试验学就是从各种具体的试验方法中概括那些带共性的基本理论和技术。它是一门专业技术基础课。通过本课程的学习, 可培养学生正确地选用测试装置, 初步掌握试验方法和测试技术, 处理试验数据和分析试验结果。为学生进一步学习、研究和处理汽车拖拉机工程技术问题打下基础。

汽车拖拉机试验学课程中涉及到过去所学的许多有关知识, 需要多种学科知识的综合运用, 其内容包括常用的试验基本理论和技能。具有涉及面宽, 实践性强的特点。学生学习过程中要注意物理概念, 掌握基本原理和特性, 密切联系实际, 加强实践环节。学习中必须通过必要的试验课, 亲自动手完成某些试验项目的全过程, 受到科学试验能力的基本训练, 才能掌握有关试验的知识和测试技术, 初步具有在实际生产、科研中组织、实施各种试验工作的能力。

第二章 测试装置的技术特性

第一节 测试的基本概念

一、测试系统的组成

测试系统是由若干相互联系、相互作用的传感器和仪器设备等元件，为实现一定测试目的而组成的有机整体。测试系统有大有小，可简可繁。复杂的测试系统是由一些基本的测试小系统组成。

随着现代科学技术的迅速发展，非电物理量的测试与控制技术，已广泛地应用于汽车拖拉机试验中。非电量的电测系统是最常用的测试系统。一个完整的测试系统应包括：传感器、信号调节器、显示和记录器以及数据处理器及外围设备。另外还有定度和校准等系统附加设备。如图2-1所示。

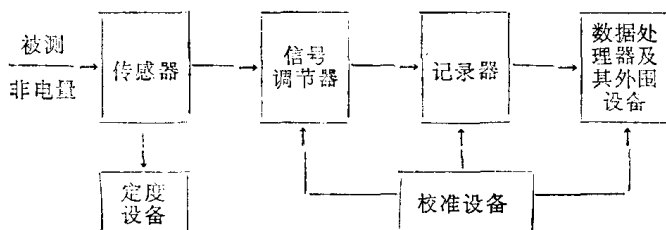


图2-1 测试系统框图

- 1) 传感器——将其输入的被测非电物理量转换为电信号。
- 2) 信号调节器——将传感器输出的电信号转换成传输不失真且便于记录、处理的电信号，如信号源的阻抗变换，信号的放大、衰减与波形变换，信号滤波，多路信号切换等。
- 3) 记录、显示器——记录或显示信号调节器输出的信号。显示必要的 数据变化图形，供直接观察分析，或将其保存，供后续仪器分析、处理。
- 4) 数据处理器——将记录的信号按测试目的与要求 提取 其有用信息，通过专用计算机进行分析、处理，如概率统计分析、相关分析、功率谱分析和传递特性分析等。
- 5) 定度和校准设备——是测试系统的附加设备。测试前要对传感器及测试系统确定其输入与输出物理量转换关系的定度曲线，并根据一种较高准确度的参考仪器进行校准，确定整个测试系统的精度。

二、对测试系统的要求及其主要特性

在汽车拖拉机试验中，经常会碰到如何选择测试仪器及组成测试系统的问题。对测试系统的要求，当然要从测试对象、测试目的和要求出发，使其达到技术上合理，经济上节约。应当综合考虑精度要求、使用环境及被测物理量变化的快慢、测量范围、成本费用及自动化程度等因素。但最基本的要求应当是具有单值的、确定的输入—输出关系，其中以输出和输入呈线性关系为最佳。使测试结果在精度要求范围内不失真地反映被测物理量，测试系统的

输出才能作为其输入（被测物理量）的量度，从而完成预定的测试任务。因此，必须了解测试仪器或系统的基本特性。

按照被测试量在测试中的状态，测试系统的基本特性可分为静态特性和动态特性两类。当被测试量不随时间变化或变化很缓慢时，测试系统的输出和输入之间的关系称为静态特性；当被测试量随时间变化时，测试系统的输出和输入之间的关系称为动态特性。

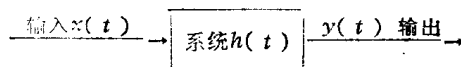


图2-2 系统、输入和输出

通常的工程测试问题总是处理输入量或被测量 $x(t)$ 、系统的传输或转换特性 $h(t)$ 和输出量 $y(t)$ 三者之间的关系，如图2-2所示。

1) 如果系统的特性已知，通过对输出信号的分析，就能推断其相应的输入信号或被测量。这就是通常的测量。

2) 如果输入信号已知，通过对输出信号的分析，就能推断出测试系统的特性。这就是通常的系统或仪器的定度过程。

3) 如果输入信号和系统的特性已知，则可以推断和估计系统的输出量。这就是通常的输出信号预测。

理想的测试仪器或系统应该具有单值的、确定的输入—输出关系，而且最好是一个单向线性系统。所谓单向系统，即是指测试系统对被测量的反作用影响可以忽略。例如振动测试时，要求传感器的质量很小，使其对被测振动物体的固有频率的影响可忽略不计。又如，在研究汽车轮胎和地面的相互作用时，测试轮胎的应力分布变化规律，需要在轮胎胎面上埋入一些压力传感器，则需要压力传感器尽量地小，使其对轮胎的弹性影响可忽略不计，当然，最好采用非接触式测试。所谓线性系统，即输出与输入是线性关系。在静态测试中，系统的线性关系虽然是所希望的，但不是必需的（因为在静态测试中，用校正曲线或输出补偿技术作非线性校正尚不困难）；在动态测试中，测试系统本身应该力求是线性系统，这不仅因为在动态测试中作非线性校正目前还相当困难，而且现在只能对线性系统作比较完善的数学处理与分析。实际测试系统不可能在较大的工作范围内保持线性。因此，只能在一定的误差范围内和在一定的工作范围内作线性处理。

第二节 测试装置的静态特性

测试装置的静态特性表示被测物理量处于稳定状态，输入和输出都是不随时间变化的常量（或变化极慢，在所观察的时间间隔内可忽略其变化而视为常量）。输出、输入关系一般可用下式表示

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n \quad (2-1)$$

式中 x —— 输入的物理量；

y —— 输出量；

$a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ —— 常数。

当 $a_0 \neq 0$ 时，表示即使在没有输入的情况下，仍有输出，通常称为零点漂移（零漂）。理想的静态量的测试装置，其输出应单值，线性比例于输入，即静态特性为 $y = a_1x$ ，是一

一条直线。

实际测试装置的静态特性指标主要以灵敏度、非线性度和回程误差来表征。此外，还有分辨率、零点漂移、温度漂移及测量范围等，可根据测试装置本身的特点和实际应用的要求确定相应的静态特性指标。

一、灵敏度

灵敏度 S 是测试装置静态特性的一个基本参数。测试装置输入 x 有一个增量 Δx ，引起输出 y 发生相应的变化 Δy ，则称

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

为该装置的绝对灵敏度，如图2-3a所示。对于特性呈直线关系的装置，有

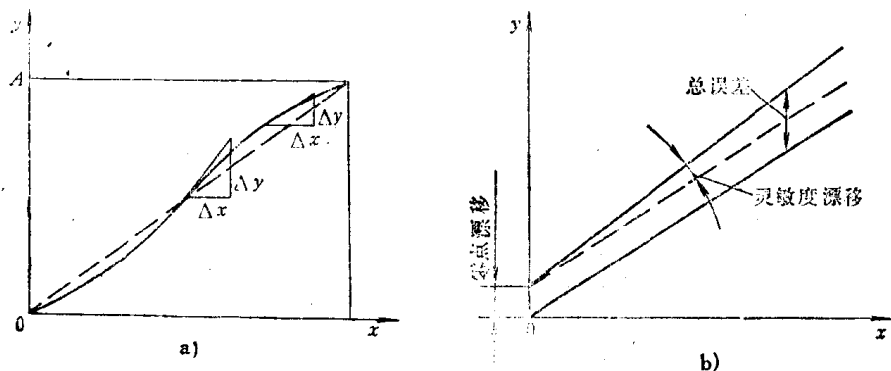


图2-3 灵敏度及其漂移

a) 灵敏度 b) 漂移

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{x}{y} = \text{常量}$$

而非线性装置的灵敏度就是该装置静态特性曲线上各点的斜率。例如，某位移传感器在位移变化1mm时，输出电压变化为300mV，则其灵敏度 $S = 300\text{mV/mm}$ 。当测试装置的输出和输入为同一量纲时，灵敏度常称为放大倍数。

以上是仅以被测量变化时考虑了灵敏度的变化。实际在被测量不变的情况下，由于外界环境条件等因素的变化，也可能引起测试装置输出的变化，最后表现为灵敏度的变化。例如，温度改变引起测试仪器中电子元件参数的变化或机械部件尺寸和材料特性的变化等，由此引起的测试装置灵敏度的变化称为“灵敏度漂移”。其根源则是这些环境条件因素的变化导致式(2-1)中系数 $a_0, a_1, \dots, a_n$ 变化所致。如图2-3b所示，常以输入不变情况下每小时输出的变化量来衡量。显然，性能良好的测试装置，其灵敏度漂移极小。

在选择测试装置（仪器）时，应当注意其灵敏度的合理性。因为一般来说，测试装置的灵敏度越高，测量范围往往越窄，稳定性也往往越差。

二、非线性度

非线性度是指测试装置的输出、输入间是否能保持常值比例关系（线性关系）的一种量度。在静态测试中，通常用试验的办法求取装置的输入、输出关系曲线，并称其为“定度曲线”。定度曲线（实际特性曲线）偏离其拟合直线（理想直线）的程度就是非线性度，如图2-4所示。作为技术指标，是采用在测试装置的标称输出范围（全量程） A 内，定度曲线与该拟合直线的最大偏差 B 与 A 的比值，即

$$\text{非线性度} = \frac{B}{A} \times 100\%$$

拟合直线的确定方法，目前国内、外尚无统一的标准，但较常用的方法是通过坐标原点（ $x = 0, y = 0$ ），并与定度曲线间的偏差 B_i 的均方值为最小，即 $\sum B_i^2$ 最小来确定。

三、回程误差

回程误差也叫迟滞误差。它也是判断实际测试装置的特性与理想装置特性差别的一项指标。理想测试装置的输出与输入应是单值的一一对应关系，而实际测试装置有时会对同一大小的输入量，其正向输入（输入量由小增大）和反向输入（输入量由大到小）的输出量数值不同，其差值称为滞后量 Δh ，如图2-5所示。测试装置全量程 A 内的最大滞后量 $\Delta h_{\max}$ 和 A 之比值称为回程误差或迟滞误差，用 E_r 表示

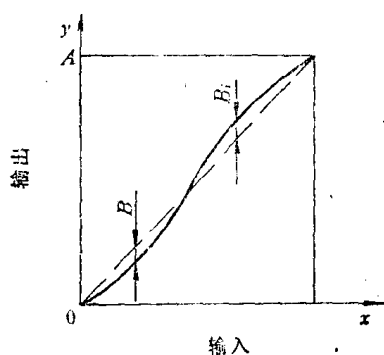


图2-4 定度曲线与非线性度

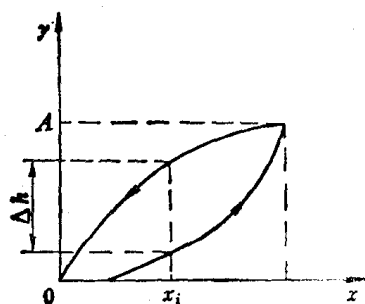


图2-5 回程误差

$$E_r = \frac{\Delta h_{\max}}{A} \times 100\%$$

回程误差一般是由滞后现象引起的后果。在磁性材料的磁化和一般材料受力变形的过程中都能发生；也可能反映仪器的不工作区（也叫死区）的存在，而不工作区则是输入变化对输出无影响的范围。摩擦力和机械元件之间的游隙是存在不工作区的主要原因。

为了使测试结果正确，要求测试系统有足够的灵敏度，而非线性度和回程误差要尽可能小。若测试系统静态参数不符合测试要求，则应找到根源所在，并设法排除和采取改善措施，以至更换测量环节或测试系统。

第三节 测试装置的动态特性

测试装置的动态特性是指输入量随时间变化时，其输出随输入而变化的关系。就动态测量用的测试装置而言，必须对其动态特性有清楚的了解，否则根据所得的输出是无法正确地确定所要测定的输入量的。在输入变化时，人们所观察到的输出量不仅受到研究对象动态特性的影响，也受到测试装置动态特性的影响。如用具有弹簧—质量系统构成的机械式千分表去测量汽车或拖拉机驾驶室上某一点的动态变形量，所得之测量结果中不仅反映驾驶室这点迅速变化的变形量，还包含测量系统动态特性的影响。因此，在动态测试中不能根据其指针最大偏摆量作为其最大变形的量度。

为降低和消除测试装置的动态特性给测量带来的误差，对于动态测量的测试装置，必须

考察并掌握测试装置的动态特性,判断测试时会产生什么误差。要研究测试系统的动态特性,首先必须建立其数学模型。要从具体测试装置的物理结构出发,根据其所遵循的物理定律,建立起把测试装置的输出和输入量联系起来的运动微分方程;然后在给定的条件下求解,从而得到任意输入 $x(t)$ 激励下测试装置的响应 $y(t)$ 。

由于测试装置一般都是线性系统,所以它们的数学模型是常系数线性微分方程,经过简单的运算即可求得其传递函数。该传递函数就能描述测试装置的固有动态特性。但在实践中对很多复杂的测试装置,即使作出不少近似的假设,也很难准确列出它们的运动微分方程式,况且即使运用上述理论分析方法得出了结果,也需要经过实际测试验证。因此,广泛实用的方法是采用试验的方法来研究分析测试装置的动态特性。首先,要根据测试装置实际工作时最常见的输入信号的形式,选择一些典型信号。在一定条件下,任意信号均可理解为由一系列不同频率的正弦信号的叠加。因此,最基本的典型信号是正弦信号。另外,常用的信号还有脉冲信号、阶跃信号及随机信号等。以上述这些典型信号作为测试装置的输入,然后测出其输出,进而对该测试装置的动态特性作出分析和评价。分析时,既可在时间域,又可在频率域进行,并分别定义出一系列动态特性参数。下面将介绍上述理论、试验方法中的一些基本概念和原理。

一、测试装置的传递函数及其频率响应特性

(一) 线性系统及其主要性质

对于大多数测试装置来说,其数学模型均可近似成一个时不变线性系统,其输入 $x(t)$ 和输出 $y(t)$ 之间的关系,可用下列微分方程式来描述

$$\begin{aligned} & a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) \\ & = b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_0 x(t) \end{aligned} \quad (2-2)$$

若 $a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0$ 和 $b_m, b_{m-1}, \dots, b_1, b_0$ 均为常数,该方程则为常系数微分方程。

若用 $x(t) \rightarrow y(t)$ 表示上述系统的输入、输出对应关系,则常系数线性系统具有如下基本性质。

(1) 叠加特性 叠加特性是指几个输入同时作用于系统时的输出,等于这些输入单独作用于系统时系统各输出的总和,即若

$$x_1(t) \rightarrow y_1(t) \quad x_2(t) \rightarrow y_2(t)$$

$$\text{则} \quad [x_1(t) + x_2(t)] \rightarrow [y_1(t) + y_2(t)]$$

(2) 比例特性 比例特性是指当系统输入增大若干倍,其输出也增大若干倍,即若

$$x_1(t) \rightarrow y_1(t)$$

则对任意常数 a ,都有

$$ax_1(t) \rightarrow ay_1(t)$$

(3) 微分特性 系统对输入微分的响应等同于对原输入响应的微分,即若

$$x(t) \rightarrow y(t)$$

则

$$\frac{dx(t)}{dt} \rightarrow \frac{dy(t)}{dt}$$

(4) 积分特性 若系统的初始状态为零,则系统对输入积分的响应等同于原输入响应

的积分, 即

若

$$x(t) \longrightarrow y(t)$$

则

$$\int_0^t x(t) dt \longrightarrow \int_0^t y(t) dt$$

(5) 频率保持性 若系统输入为某一频率的正弦(余弦)激励, 则其稳态输出也将只有该同一频率而不改变。简单证明如下:

由于

$$x(t) \longrightarrow y(t)$$

根据上述比例特性, 对于某一已知频率 ω , 有

$$\omega^2 x(t) \longrightarrow \omega^2 y(t)$$

又按其微分特性, 有

$$\frac{d^2 x(t)}{dt^2} \longrightarrow \frac{d^2 y(t)}{dt^2}$$

对上两式应用其叠加特性, 就有

$$\left[\frac{d^2 x(t)}{dt^2} + \omega^2 x(t) \right] \longrightarrow \left[\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \omega^2 y(t) \right]$$

现令输入为一正弦激励, 记作 $x(t) = x_0 e^{i\omega t}$, 则其二阶微分为

$$\frac{d^2 x(t)}{dt^2} = (j\omega)^2 x_0 e^{i\omega t} = -\omega^2 x(t)$$

即

$$\frac{d^2 x(t)}{dt^2} + \omega^2 x(t) = 0$$

相应的输出应为

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \omega^2 y(t) = 0$$

于是输出 $y(t)$ 唯一的一种可能解就是

$$y(t) = y_0 e^{i(\omega t + \varphi)}$$

线性系统这些主要特性, 特别是频率保持性在动态测试中具有重要的作用。如已知系统是线性的, 其输入的激励频率也已知(例如是动不平衡引起的振动或是稳态正弦激励), 那么测量信号中就只有与激励频率相同的频率成分才可能是由该激励引起的振动, 而其它频率完全是噪声干扰。

(二) 传递函数

前面已经指出时不变线性系统及其主要特性, 它是一种理想的系统, 然而实际的测试系统都能在一定的误差范围内和一定量程范围内看成时不变线性系统。通常可以用式(2-2)来描述输出 $y(t)$ 和输入 $x(t)$ 之间的关系。可对微分方程进行拉氏变换建立传递函数的概念来表示它的动态特性。传递函数是代数方程, 将使其解算简化、方便而直观, 避免了解微分方程的困难, 且便于分析研究系统动态特性。因此, 传递函数是我们对元件及系统分析、研究与综合的有力工具。

若线性系统的初始条件为零, 即在考察时刻以前($t = 0^-$), 其输入量、输出量及其各阶导数均为零, 则对式(2-2)进行拉氏变换, 得

$$\begin{aligned} & (a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0) Y(s) \\ &= (b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0) X(s) \end{aligned} \quad (2-3)$$

将输出量和输入量两者的拉氏变换之比定义为传递函数 $H(s)$, 即

$$H(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (2-4)$$

传递函数以代数式的形式表征了系统的传输、转换特性，其分母中 s 的幂次 n 代表系统微分方程的阶数，如 $n=1$ 或 $n=2$ ，就分别称为一阶系统或二阶系统的传递函数等。传递函数是一种对系统特性的解析描述。它包含了瞬态、稳态时间响应和频率响应的全部信息。传递函数有以下特点：

1) $H(s)$ 描述了系统本身的动态特性，它与输入量无关。

2) $H(s)$ 不说明被描述系统的物理结构，不管是电路系统，还是机械系统，只要动态特性相似，就可用同一类型传递函数 $H(s)$ 来描述，如液柱温度计和简单的 RC 低通滤波器同是一阶系统，传递函数相似。动圈式电表、示波器振子、简单的弹簧质量系统和 LRC 振荡电路都是二阶系统，同样具有相似的传递函数。

(三) 环节并联和串联的测试系统

由各个元件组成的系统，可能是电气的、机械的、液压的和气动的等。尽管这些系统的物理本质差别很大，但是描述它们的动态特性的传递函数可能是相同的。如果我们从数学的表达式出发，可将一复杂的系统看成由有限的一些典型环节所组成，而这些典型环节的传递函数较容易求得，这将给我们分析和研究复杂的系统带来很大方便。环节与元件不同，环节是从动态性能的角度来看的，即典型环节是以数学模型来划分的，其传递函数具有典型性。一个典型环节可由一个或几个不同的元件所组成。如用电感、电阻和电容三个元件可构成一个振荡环节，如图2-6所示。

一个系统是由若干个环节组成，为了求得整个系统的传递函数，需要研究系统中各环节的联系，以下是介绍怎样根据环节之间的联接来计算系统的传递函数。

两个传递函数各为 $H_1(s)$ 和 $H_2(s)$ 的环节，如果串联后（见图2-7）它们的阻抗匹配合适，相互间不影响彼此的工作状况，则所组成的系统的传递函数 $H(s)$ 为

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{Z(s)}{X(s)} \frac{Y(s)}{Z(s)} = H_1(s) H_2(s)$$

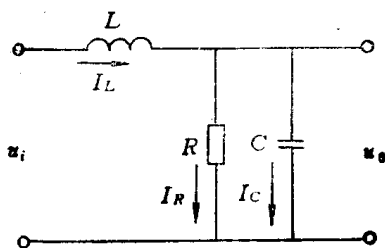


图2-6 LRC电路

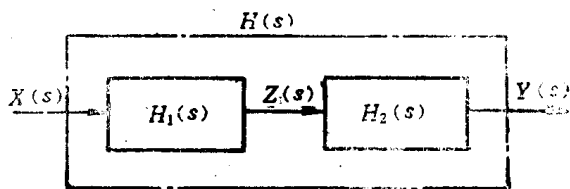


图2-7 两个环节的串联

类似地，对 n 个环节串联组成的系统，有

$$H(s) = \prod_{i=1}^n H_i(s) \quad (2-5)$$

若两个环节并联（见图2-8），则因

$$Y(s) = Y_1(s) + Y_2(s)$$

故其传递函数为

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{Y_1(s)}{X(s)} + \frac{Y_2(s)}{X(s)} = H_1(s) + H_2(s)$$

由 n 个环节并联组成的系统, 同样类似地有

$$H(s) = \sum_{i=1}^n H_i(s) \quad (2-6)$$

(四) 传递函数的分解

一般测试装置可简化成时不变线性系统, 建立起常系数线性微分方程式, 其一般形式的传递函数如式 (2-4) 所示。根据大多数测试装置的情况, 可以假设

$$b_m = b_{m-1} = \dots = b_1 = 0$$

则式 (2-4) 可简化为

$$H(s) = \frac{b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}$$

其中分母是变量 s 的实系数多项式, 它总可以分解为一次和二次的实系数因子式

$$H(s) = A \prod_{i=1}^r \left(\frac{1}{s + P_i} \right)^{(n-r)/2} \prod_{j=1}^{(n-r)/2} \left(\frac{1}{s^2 + 2\zeta_j \omega_{n_j} s + \omega_{n_j}^2} \right) \quad (2-7)$$

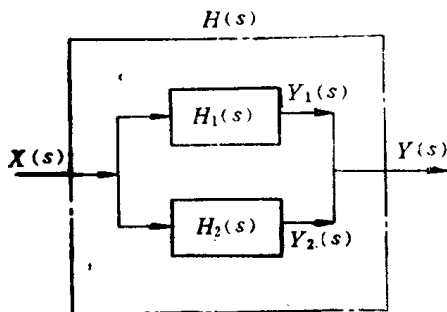


图2-8 两个环节的并联

式 (2-7) 中每一个因子式可看成是一个子系统的传递函数。其中 A 表示零阶系统传递函数; $1/(s + P_i)$ 是一阶系统传递函数; 而 $1/(s^2 + 2\zeta_j \omega_{n_j} s + \omega_{n_j}^2)$ 是二阶系统的传递函数。这可通过对其相应的微分方程进行拉氏变换而得到验证。一个复杂的高阶系统总是可以看成是由若干零阶、一阶和二阶系统串联而成。零阶系统的动态特性参数为静态灵敏度 S 。其主要特点是系统输出与输入有固定比例, 无任何相位差。

(五) 频率响应函数

对于稳定的常系数线性系统, 如取 $s = j\omega$ 代入式 (2-4), 就可得到

$$H(j\omega) = \frac{b_m(j\omega)^m + b_{m-1}(j\omega)^{m-1} + \dots + b_1(j\omega) + b_0}{a_n(j\omega)^n + a_{n-1}(j\omega)^{n-1} + \dots + a_1(j\omega) + a_0}$$

式中, $j = \sqrt{-1}$ 。 $H(j\omega)$ 称为频率响应函数或频率响应特性。实质上它就是在频率域中, 反映一个系统的正弦输入 (或激励) 的稳态响应。它是复数, 具有相应的模和相角。

对于稳定的常系数线性系统, 若输入为一正弦函数, 则稳态时的输出也是与输入同一频率的正弦函数。输出的幅值和相位角往往不等于输入的幅值和相角。输出、输入幅值的比值和相角差是输入频率的函数, 并反映在频率响应函数 $H(j\omega)$ 的模和相角上。

如将 $H(j\omega)$ 的实部和虚部分开, 并记作

$$H(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega)$$

则 $P(\omega)$ 和 $Q(\omega)$ 都是 ω 的实函数, 所画出的 $P(\omega) - \omega$ 曲线和 $Q(\omega) - \omega$ 曲线分别称为该系统的实频特性和虚频特性曲线。

如将 $H(j\omega)$ 写成下列形式

$$H(j\omega) = A(\omega) e^{i\varphi(\omega)} \quad (2-8)$$

则

$$A(\omega) = |H(j\omega)| = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)}$$