

普通高等教育规划教材

汽车试验学

(车辆工程专业)

郭应时 袁 伟 / 主编



人民交通出版社

China Communications Press

普通高等教育规划教材

Qiche Shiyanxue

汽车试验学

(车辆工程专业)

郭应时 袁伟 主编

人民交通出版社

内 容 提 要

本书主要讨论了汽车试验研究的原理、方法及相关技术。内容包括:汽车试验测试系统的静、动态特性;汽车试验的基本理论和试验设计方法;试验测试系统中常用传感器、调理电路和数据采集系统的工作原理与特性;现代测试系统与计算机应用;虚拟试验技术;试验的静态数据处理和信号分析处理的原理与方法。

本书可作为车辆工程及相关专业本科生和研究生的专业基础课教材,也可供有关研究人员、工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

汽车试验学/郭应时,袁伟编著. —北京:人民交通出版社,2006.6

ISBN 7-114-06034-3

I. 汽... II. ①郭...②袁... III. 汽车试验-高等学校-教材 IV. U467

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 059256 号

书 名: 汽车试验学

著 作 者: 郭应时 袁 伟

责任编辑: 林宇峰

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)85285838, 85285995

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 16.75

字 数: 419 千

版 次: 2006 年 6 月 第 1 版

印 次: 2006 年 6 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-114-06034-3

印 数: 0001—2000 册

定 价: 30.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

在汽车问世 100 多年的历程中,汽车的试验研究始终伴随其发展的脚步。可以说汽车的试验研究见证了汽车的发展,提升了汽车的技术,完善了汽车的品质,丰富了汽车内涵。在科学技术飞速发展的今天,汽车的试验研究仍将为汽车技术的发展铺平道路。

本书是在编者多年从事汽车试验教学和实践的基础上编写完成的。考虑到本科教育已逐步由专业教育向素质教育转化的现实,编者在内容组织上增加了一些基础理论的内容,扩大了知识覆盖面,同时注重知识的实用性和系统性,力求内容通俗易懂。这样一方面使学生可以利用较少的学时,系统全面地了解从事汽车试验研究所需的知识要点;另一方面,也为学生今后的深入学习提供了方便条件。此外,鉴于计算机软硬件技术的飞速发展,以计算机为核心的集成化数字测试系统大有全面取代传统仪器的趋势。本书基本摒弃了对传统仪器的介绍,重点讨论了基于计算机软硬件技术的现代测试系统的组成方式与工作原理,同时也对最近几年发展起来的虚拟试验技术作了简要的介绍。

本书的绪论、第 1~6 章由郭应时编写,第 7~9 章和第 10 章的 10.3、10.4、10.6、10.7 节由袁伟编写,第 10 章的 10.1、10.2、10.5 节由刘喜东编写。另外,祝亚军、马勇、付东华、李占峰、李晓萍、薛兆俭、黄迎秋等同志为本书的编写提供了宝贵的资料。全书由郭应时统稿。书稿的部分内容直接选用了成熟教材中的有关章节,在此对原书作者表示衷心的感谢。长安大学的魏朗教授和陕西汽车集团公司的刘玺斌研究员级高级工程师在百忙之中抽出时间审阅了书稿,并提出了中肯的意见,在此一并表示感谢。

本书为长安大学规划系列教材,由学校资助出版,适合车辆工程及相关专业作为教材使用,也可供有关研究人员、工程技术人员参考。

由于编者的水平有限,书中错误和疏漏在所难免,敬请读者批评指正。

编 者
2006 年 5 月

目 录

绪论	1
0.1 概述	1
0.2 汽车试验的分类与特点	2
0.3 汽车试验计划与组织	3
0.4 本书的主要内容	5
第1章 试验测试系统的技术特性	6
1.1 试验测试系统的基本概念	6
1.2 试验测试系统的静态特性	9
1.3 试验测试系统的动态特性	11
1.4 测试装置的动态响应特性	15
1.5 测试系统对瞬态激励的响应	23
1.6 测试系统频率特性的测定	28
第2章 测量不确定度与误差理论	31
2.1 概述	31
2.2 测量误差	34
2.3 随机误差的分布规律	37
2.4 测量的精密度分析	40
2.5 直接测量参数测定值的处理	45
2.6 系统误差	48
2.7 异常数据的取舍	52
第3章 试验设计	56
3.1 基本概念	56
3.2 2^2 因子设计	57
3.3 正交设计	65
3.4 混合水平正交设计	71
第4章 模型试验基础	76
4.1 相似现象及概念	76
4.2 相似理论基础	78
4.3 相似准则的求解	81
4.4 模型实验的数据处理	90
第5章 测试系统基本单元模块(1)——传感器与调理电路	94
5.1 传感器概述	94
5.2 电参数型传感器	96

5.3 电量型传感器	114
5.4 频率输出型数字传感器	131
5.5 放大器	134
第6章 测试系统基本单元模块(2)——数据采集系统	139
6.1 数据采集系统概述	139
6.2 数据采集系统的基本组成	140
6.3 数据采集系统简介	150
第7章 现代测试技术	152
7.1 概述	152
7.2 多通道数字信号测试系统	152
7.3 试验的程序控制技术	153
7.4 智能仪器与自动测试系统	157
7.5 虚拟试验技术	163
7.6 综合应用实例	170
第8章 静态试验数据的处理	172
8.1 试验数据的插值	172
8.2 试验数据的图形表示	175
8.3 一元线性回归	178
8.4 二元线性回归	182
8.5 多元线性回归	185
8.6 非线性回归	187
第9章 信号分析处理技术	193
9.1 信号的分类	193
9.2 信号的时域分析及应用	198
9.3 信号的频域分析及应用	204
第10章 典型汽车试验及设备	215
10.1 基本性能试验	215
10.2 汽车操纵稳定性试验	225
10.3 汽车平顺性试验	231
10.4 汽车可靠性试验	236
10.5 汽车的空气动力性能试验	242
10.6 汽车被动安全性试验	248
10.7 汽车试验场	257
参考文献	261

绪 论

0.1 概 述

汽车作为人类交通运输工具问世已经有 100 多年的历史了,它的出现和发展给人类社会带来了无可估量的经济效益和社会效益。伴随着汽车日益走向成熟,汽车产品的研究开发、设计生产等相关领域的发展也日臻完善,并不断推陈出新。而这一切都与汽车的试验研究密不可分。

0.1.1 汽车试验研究的作用

作为工业产品,汽车具有许多特点:汽车的使用条件复杂,既有复杂多变的使用环境,又涉及不同的使用人群和使用方式,具有不同的用途;集成度高,它是融合了机械、电子、材料、化工、石油等多个领域先进技术和成果的综合性产品;对产品的性能、寿命、质量和成本等方面综合质量和性能要求高;影响产品质量和技术性能的因素和环节多,所涉及的技术领域也极为广泛;涉及了环境保护和交通安全。因此汽车产品的品质与价格综合性能(性价比)不断提高,使之成为市场广阔、受众普遍的工业产品。

在汽车技术发展的过程中,针对市场变化和用户的需求,不断出现新的需要研究解决的问题:一方面相关领域新的技术和研究成果的应用,技术上许多创新和突破以及新车型的开发设计,都要求以试验研究为基础,或是经过试验来检验,帮助研究人员深入了解汽车在实际使用中各种现象的本质及其规律,并推动其技术的进一步发展;另一方面,汽车的试验研究,往往可以有效地解决汽车开发研究过程中无法通过理论计算和分析得到有效解决的问题,如汽车的结构强度分析,汽车抗撞特性研究,汽车的空气动力性能等。可见,汽车的试验研究是汽车技术发展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。

0.1.2 汽车试验研究的发展

汽车产品及其工业是在 19 世纪末 20 世纪初产生的。早期的汽车基本采用了手工单件方式生产,产品批量小,性能不高而且成本高昂。随着生产方式转向生产流水线作业,部分总成专业化生产,汽车工业生产率显著提高,成本下降,批量增加,有效地增加了社会保有量。同时,20 世纪上半叶的第二次世界大战对工业技术的刺激作用和战争对军需物资的拉动效应,客观上促进了汽车工业整体技术水平的提高。至 20 世纪 40 年代,汽车工业已广泛采用了大规模生产技术及流水生产线。而此时道路条件已得到相应的改善,车速明显提高,汽车产品的各项性能存在的问题逐步突显,迫切需要通过试验研究工作加以解决,并且出于市场竞争的需要,其性价比的提高也是厂商迫切的需求。为此,生产厂商进行了大量的有关材料、工艺、可靠性以及性能等诸方面问题的试验研究。这期间的试验技术除借用其他行业比较成熟的方法外,也逐渐形成汽车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,成为汽车试验的基本方法之一。这时也出现了早期的汽车试验场。应该说,早期的汽车试验,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。由于专业化和协作生产的需要,也开展了制定各种标准,规范的研究工作,其中包括试验方法标准的制定。

第二次世界大战以后至 20 世纪 70 年代,全世界汽车保有量剧增,其结构和性能方面有大幅度的改善和提高。这一时期汽车工业的主要特点是,既保持着大规模生产,又有向多品种和高技术发展的趋势。由于汽车生产发展的需要,同时也是许多相关工业、相邻学科的发展和渗透的结果,汽车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。出现了各种数据采集、变换、放大、储存、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试验中占有十分重要的地位。

汽车工业发展到 20 世纪 70 年代以后,不仅保持了大规模、多品种和高技术的特征,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,高技术的应用越来越多。特别是电子技术的高度发展,电子计算机的应用对汽车试验也起到了巨大的促进作用。电子计算机在汽车的性能预测、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。

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。

近年来,由于传感器技术、大规模集成电路、计算机控制和以计算机为核心的智能仪器的发展,传统的电测技术有了质的飞跃,使得汽车的试验技术向着大规模、集成化、智能化方向发展,大大提高了试验工作的效率和水平,客观上也促进了汽车技术和相关研究的发展。

在许多生产企业和研究单位中,试验研究已成为独立的技术部门,拥有试验研究中心和综合性试验基地,能够相对独立完成各种试验研究工作。

0.2 汽车试验的分类与特点

汽车是一个由成千上万个零部件组装成的产品,每个零件的品质与功能,都有可能直接影响汽车的性能。因此,有关汽车的试验研究内容很广,需要解决的问题也极为复杂,既有涉及产品品质的检查性试验,也有涉及性能对比研究研发性试验,以及涉及安全和环保的认证试验等,从事汽车试验的单位和部门也包括了生产企业、科研部门和认证机构、使用单位,可见,汽车试验研究本身已经成为伴随汽车技术发展的一个相对独立的研究领域。

汽车试验可按其试验目的、试验对象和试验方法进行分类。

1. 按试验目的分类

①品质检查试验。对目前生产的汽车产品,定期进行品质检查试验,鉴定产品品质的稳定性。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 GB 1333—77《汽车产品质量定期检查试验规程》。

②新产品定型试验。在新型汽车投产以前,首先按规程进行全面性试验,同时在不同地区(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。

2. 按试验对象分类

①整车试验目的是考核评定整车的主要技术性能,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、悬架装置的特性以及它们的结构强度、疲劳寿命和耐久性等。

③零部件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。

3. 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室外道路试验。汽车在实际使用的道路条件下现场试验,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。

0.3 汽车试验计划与组织

汽车试验是一项技术性较强的工作,同时又是一个涉及多部门、多学科密切配合的系统工程,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3个阶段。

0.3.1 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、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. 仪器设备的准备

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。

0.3.2 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,及时做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做出明确规定,同时还要采取相应的安全措施。

0.3.3 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,对被试件做出评价,并得出结论,撰写试验报告和研究报告。

试验报告内容一般包括:问题的提出和简要测试方案;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;试验方案设计与试验方法;测试系统仪器选配;传感器定度;数据处理方法、处理结果与误差范围;试验结果分析;结论;存在问题和进一步的改进意见;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。

0.4 本书的主要内容

汽车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、研究和处理汽车工程技术问题打下基础。

本课程讨论的主要内容包括:

①汽车试验中测试系统的静、动态特性;

②汽车试验过程中所要应用的基本理论方法,如测量不确定度与误差理论,模型试验理论与方法,试验设计的基本理论;

③试验测试系统中常用传感器、调理电路的工作原理与特性;

④测试系统中的数据采集系统;

⑤现代测试系统与计算机应用;

⑥试验的静态、动态数据处理原理与方法。

汽车试验学课程中涉及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和科研中组织、实施各种试验工作的能力。

第 1 章 试验测试系统的技术特性

1.1 试验测试系统的基本概念

1.1.1 测试系统的组成

测试系统是由若干相互联系、相互作用的单元(试验装置、仪器设备和传输及控制部件),为实现特定的测试目的而组成的有机整体。对于实现不同目的的试验测试系统来说,其复杂程度是不同的,通常可以由一些基本的、实现单一功能的基本系统组成。

现代技术条件下的试验测试系统,主要是采用了非电参量的电测技术。图 1-1 所示为典型试验测试系统的组成框图。

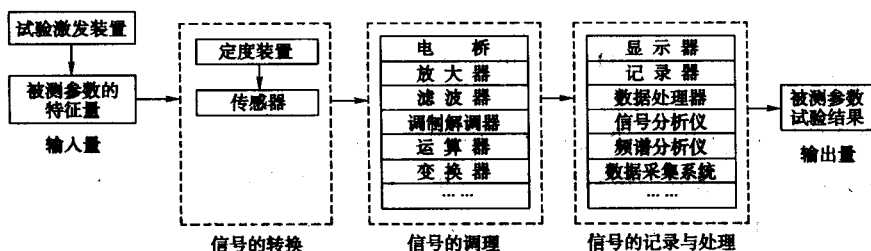


图 1-1 典型试验测试系统的组成框图

一般情况下,一个完备的试验测试系统应包括:

①信号的转换系统。通常使用相应的传感器,将被测非电参量转换为电参量信号,作为测试系统的输入信号。

②信号的调理系统。这一系统通常由若干个放大器、滤波器、变换器等组成,通过信号源的阻抗变换,信号的放大、衰减与波形变换,信号滤波,多路信号切换或调制解调,将传感器输出的电信号变换成不失真且便于传输、记录、处理的电信号。

③信号的记录与处理系统。一方面对包含被测参数信息的信号进行记录或显示,显示必要的变化图形,供直接观察分析,或将其保存,供后续仪器分析、处理。另一方面,将记录的信号按测试目的与要求提取其有用信息,通过专用或通用计算机进行分析、处理,诸如概率统计分析、相关分析、功率谱分析和传递特性分析等。

此外,为确保测试系统的有效工作,还应包括相应的辅助装置。

④试验的激发装置。需要建立相应的试验激发装置(试验台),作为试验测试系统的前端,用以最大限度地获得被测参数可能的特征量。

⑤定度和校准装置。是测试系统的辅助设备。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。

1.1.2 测试系统的数学模型

事实上,试验测试的核心问题就是分析和研究被测参量、测试系统的特性和测量结果之间的关系。如果我们从系统的角度来研究问题,我们可以把测试系统抽象成简单的系统模型,如图 1-2 所示。

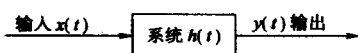


图 1-2 测试系统的抽象模型

其中:输入量 $x(t)$ ——测试过程中的被测参量;

系统的传输或转换特性 $h(t)$ ——测试系统自身所具备的特性;

输出量 $y(t)$ ——测试的结果。

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:

①如果系统的特性已知,通过对输出信号的观察分析,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,通过对输出信号的观察分析,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。

可见,只有深入掌握三者之间的相互关系,才能有效地解决工程试验测试问题。

试验测试系统的数学模型是根据相应的物理定律(如牛顿定律、能量守恒定律等)而得出的一组将系统的输入与输出联系起来的微分方程式。它能够深刻地反映出测试系统的特性的品质,预测作用在各个仪器上的输入量、外界干扰量和仪器自身的内部参数对测试的影响。因此,我们需要借助系统的数学模型来研究测试系统及相关环节的属性。

一般地,大多数的测试系统都可以假定为具有集中参数、有限自由度和参数时不变系统的物理系统。因此,测试系统也都可以作为线性定常系统处理,即系统的输入信号(激励) $x(t)$ 和输出信号(响应) $y(t)$ 之间可用下列微分方程式来描述:

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

式中: $\frac{d^n y(t)}{dt^n}$ 和 $\frac{d^m x(t)}{dt^m}$ ——分别为系统的输出、输入对时间的微商;

a_n, b_m ——系统的结构特性参数。

若 $a_n, a_{n-1}, \cdots, a_1, a_0$ 和 $b_m, b_{m-1}, \cdots, b_1, b_0$ 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:

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

则:

$$[x_1(t) + x_2(t)] \rightarrow [y_1(t) + y_2(t)]$$

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:

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

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:

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

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:

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

则:

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

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。

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, 而其他频率完全是噪声干扰。

1.1.3 理想测试系统

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。

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。然而, 实际测试系统不可能在较大的工作范围内保持线性。因此, 我们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。

1.1.4 测试系统的基本要求

对测试系统的要求, 一般要从测试对象、测试目的和要求出发, 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, 使其达到技术合理, 经济实用。

所谓技术合理, 主要从以下几个方面考虑:

①测试系统应当具有单值的、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;

②保证具有与测试目的和要求相适应的测量精度;

③测试过程中信号不失真。即测试系统在任何时刻的输出与对应时刻的输入之比是确定

的常数,以保证测试结果在精度要求范围内不失真地反映被测物理量;

④系统必须有足够的信噪比。信噪比过小甚至使信号淹没在噪声中,使得所需要的信息无法正确分离获取,将给测试结果带来很大的不确定度;

⑤系统响应的时间较短。任何测试的过程都存在整个测试系统达到稳态的响应时间,而只有稳态的输出才能得到稳定可靠的数据。因此,良好的动态测试系统应该具有尽可能短的响应时间和尽可能小的超调量。

然而,在实现上述技术要求的同时,必然存在着相应的测试成本问题。所谓经济实用,既要综合考虑必要的技术要求,又要确定合理的尺度,不至于因过分追求技术上的要求而盲目增加不必要的测试成本,加大试验费用。

1.1.5 测试系统的特性

为了使测试系统发挥正常的效能,必须全面掌握测量系统的特性。这是设计、选购和使用系统并正确处理和表达测量结果的基础。

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。

1.2 试验测试系统的静态特性

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)。此时,输入输出关系一般可用下式表示:

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots + a_n x^n \quad (1-2)$$

式中: x ——输入的物理量;

y ——输出量;

$a_0, a_1, a_2, \cdots, a_n$ ——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,其输出应是单值的,且线性比例于输入,即静态特性为 $y = a_1 x + a_0$,其输入与输出关系曲线是一条直线。

实际测试装置的静态特性指标主要以准确度、灵敏度、非线性度、重复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。

1. 准确度

准确度是指测量系统的测定值与被测参数真值相符合的程度。它是表征测量系统静态特性的主要性能指标。

由于各种测量系统存在着本质的区别,其影响测定值与真值符合程度的误差因素也是不确定的。因此,难以一概而论地制定严格的准确度的概念,一般意义上的准确度的概念是一个定性的概念。大多数情况下,可以按准确度等级、系统测量误差或系统最大允许误差等方式加以描述。

2. 灵敏度

灵敏度 k 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

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

为该装置的绝对灵敏度, 如图 1-3 所示。对于特性呈直线关系的装置, 有:

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y}{x} = C(\text{常量})$$

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。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 (1-2) 中系数 $a_0, a_1, \dots, a_n$ 变化所致。如图 1-4 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。

3. 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 1-5 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 $\Delta y_{\max}$ 与 A 的比值, 即

$$L_N = \frac{\Delta y_{\max}}{A} \times 100\%$$

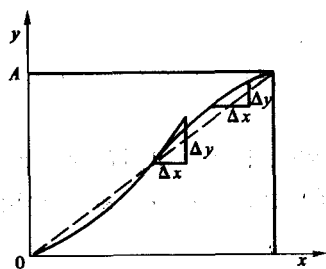


图 1-3 灵敏度

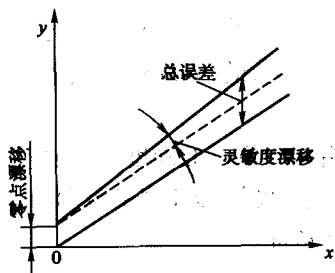


图 1-4 灵敏度漂移

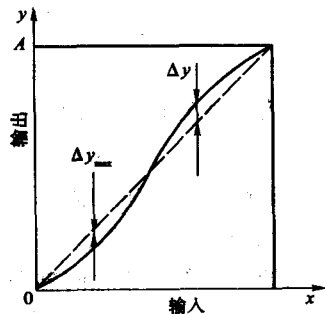


图 1-5 定度曲线与非线性度

4. 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 1-6 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。

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

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可能发生;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。

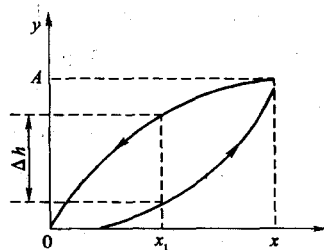


图 1-6 回程误差

5. 重复度

重复度是指在相同条件下,重复测量同一个被测参数时测定值的一致程度。任何一种测试系统,只要被测参数的真值与测量值之间存在一一对应的确定性单调关系,且这种关系是可重复的,这个系统就是可信的,有效的,能够满足需要的。可见,测量的重复度也是测试系统的重要指标。

在重复度的定义中,相同的测试条件称为重复性条件。它包括:相同的测试程序,相同的测试者,在相同条件下使用相同的测试设备,相同的短时间段(测试者的能力、测试系统参数及使用条件均保持不变的时间段)内重复测试。测量值的一致程度就是指测量值分散在允许的范围,可以用测量值的离散程度定量表示。

为了使测试结果最大限度地反映出实际情况,要求测试系统有较高的准确度、重复度和足够的灵敏度,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,以致更换测量环节或测试系统。

1.3 试验测试系统的动态特性

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驾驶室上某一点的动态变形量,所得的测量结果中不仅反映驾驶室这点迅速变化的变形量,还包含千分表的弹性-阻尼特性,即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,即使做出不少近似的假设,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