

吕恬生 沈乃勋 编

机械原理实验技术



上海科学技术文献出版社

机械原理实验技术

吕恬生 沈乃勋 编

上海科学技术文献出版社

机械原理实验技术

吕桔生^{*} 沈乃勋 编

上海科学技术文献出版社出版发行
(上海市武康路2号)

长 华 一 号 一 座 经 销

昆山亭林印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/32 印张 8.75 字数 215,000

1988年12月第1版 1988年12月第1次印刷

印数: 1—6,500

ISBN 7-80513-161-9/T·50

定价: 4.45 元

《科技新书目》169-234

序 言

机械原理实验技术是工程试验和测试技术的重要组成部分之一。随着科学技术的飞速发展,机械原理实验技术得到了广泛的应用,它在机械产品的设计、研究和性能改进上的作用日益得到重视。以往,介绍这方面内容的专著很少。为满足工业生产、科学研究和高等院校机械原理实验教学的需要,我们编写了本书。在编写时,我们力求使本书的内容比较新颖,并具有较高的实用价值,较系统地综合介绍了机械原理实验的基本原理、测试方法和常用仪器,以方便读者了解和掌握。

本书由吕恬生和沈乃勋合作编写。吕恬生负责编写概论、第一、五、七章及附录,沈乃勋负责编写第二、三、四、六章。

限于编者的水平,书中难免有遗漏和错误,恳请读者批评、指正。

上海交通大学

吕恬生 沈乃勋

1988.10

目 录

概论	1
第一章 测量误差分析和数据处理	7
§ 1-1 测量误差的分类	7
§ 1-2 误差的分析与处理方法	9
§ 1-3 试验数据处理方法和基本步骤	16
§ 1-4 试验数据的采样和标定	24
§ 1-5 曲线拟合和插值微分	28
第二章 机构运动参数检测技术	33
§ 2-1 位移的检测	33
§ 2-2 速度的检测	50
§ 2-3 加速度的检测	64
§ 2-4 机构运动参数检测的实验实例	65
第三章 机构动力学参数检测技术	73
§ 3-1 构件质心的测定方法	73
§ 3-2 构件转动惯量的测定方法	76
§ 3-3 构件作用力的检测	92
§ 3-4 扭矩的检测	105
§ 3-5 机构动反力的检测	113
§ 3-6 摩擦系数及效率的检测	115
第四章 齿轮检测技术	125
§ 4-1 齿轮基本参数的检测	125
§ 4-2 齿轮的范成实验	129

§ 4-3 渐开线齿廓曲线的检测	132
第五章 凸轮检测技术	135
§ 5-1 凸轮检测的内容	135
§ 5-2 凸轮廓线检测设备	138
§ 5-3 直动从动杆盘形凸轮廓线的检测技术	143
§ 5-4 摆动从动杆盘形凸轮廓线的检测技术	150
§ 5-5 圆柱凸轮与移动凸轮廓线的检测技术	154
§ 5-6 凸轮廓线检测仪器的调整和工件的安装	157
§ 5-7 凸轮升程检测零点的确定	161
§ 5-8 凸轮廓线相对位置的测量	166
第六章 机械的平衡技术	170
§ 6-1 转子的静平衡试验	170
§ 6-2 转子的动平衡试验	175
§ 6-3 机械系统的整机平衡试验	219
§ 6-4 机构平衡试验	222
第七章 计算机技术在机械原理实验中的应用	228
§ 7-1 机械原理实验数据的计算机处理和计算	228
§ 7-2 齿轮范成计算机演示实验	232
§ 7-3 凸轮从动杆运动分析的实用计算机程序简介	235
§ 7-4 机械原理实验中微型计算机的数据采集和处理	241
附录	
附录 1 样本均值 $\bar{x}$ 和标准差 s 的计算程序	246
附录 2 频数分布和直方图计算程序	243
附录 3 曲线拟合计算程序	248
附录 4 齿轮范成演示实验程序	252
附录 5 摆动从动杆运动分析计算程序	256
参考文献	272

概 论

机械原理实验技术是机械检测技术的重要组成部分。近年来,随着科学技术的发展,先进的测试仪表和计算机的应用,使机械原理实验技术迅速向纵深发展,它在工业生产中的重大实用价值正越来越引起工程技术人员的高度重视,在机械设计理论的研究、机械性能的改进、新机械的设计等方面得到了极为广泛的应用。

一、机械原理实验的目的

机械原理课程研究的是各种机械的基本理论问题。

在日常生活和生产活动中,人们经常要接触到各种各样的机械,例如发电机、内燃机、机床、拖拉机、汽车、包装机械等。各种不同的机械,虽然它们的形式、构造和用途不同,但为了改进和提高它们的性能,设计新的机械,往往要解决许多共同的问题,譬如如何使工作构件按确定的运动规律运动以完成特定的工作要求;如何进行转子和机构的平衡以减少机械的振动和噪声;如何提高机械系统的效率以提高机械系统使用寿命和节约能源等。机械原理实验的目的就在于采用实验的方法寻求解决这些问题的途径,如机构运动学和动力学参数的测定;或直接改善机械的动态性能,如高速转子和机构的平衡。

国民经济要飞速发展,首先机械产品要升级换代。先进的机械产品要向高速、多功能、全自动、小型化的方向发展,各种机械的工作性能,包括工作运动的精度、功率的损耗、振动与噪声、使用寿命等都应有严格的要求。采用各种现代设计方法,如计

计算机辅助设计和机械优化设计, 能给新机械的设计和工作机械的性能改进提供一定的理论依据。但由于理论分析和计算往往只能是实际情况的近似和模拟, 因而新设计的机械是否符合预定的设计要求, 机械性能的改善是否达到了要求的目标, 都必须用实验的方法加以验证, 并提供实验依据。在实际情况比较复杂, 理论计算无法获得较为理想的计算结果的情况下, 采用实验的方法寻求解决问题的途径就是唯一可靠的手段。另外, 各种现代设计方法的进一步完善和发展, 尤其是合理的数学力学模型的建立, 必须以实验的数据和结果作基础。要迅速提高我国机械产品的设计制造水平, 必须进一步重视和发展机械原理实验技术, 而随着机械产品的设计和生产水平的提高, 机械原理实验的重要性将会更加显著。

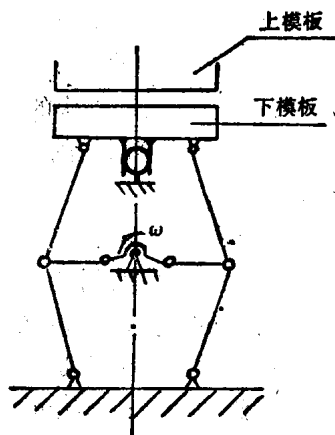
二、机械原理实验的内容

机械原理实验的内容很广泛, 一部分是用以验证机械原理课程中的基本理论, 如齿轮范成加工实验是用以显示和验证齿轮加工的范成原理, 但绝大部分的机械原理实验在工业生产中具有实用价值。限于篇幅, 本书中将重点介绍在工业生产中常用的机械原理实验技术和检测仪器, 并附有部分检测实例, 供读者参考。

高速刚性转子和挠性转子的动平衡是机械原理中的重要实验项目之一。高速精密机械中的回转主轴, 如发电机主轴、仪表主轴、冷却塔风叶等, 一般都需经过工业动平衡, 以减小主机的振动和噪声, 提高机器的使用寿命。对比较复杂的机械系统, 有时也需要进行动平衡。例如为减小家用缝纫机的振动, 需要对它进行整机平衡。平衡时可以在缝纫机主轴上加一平衡块, 平衡块的大小和安装相位可以用计算机进行计算。但由于缝纫机机构复杂, 零件很多, 因此检测与计算工作量很大。更重要的

是, 由于批量生产的缝纫机零件的加工误差、零件重心的位置和转动惯量的检测误差、零件的安装间隙以及机器运转时的不均匀摩擦等随机因素的存在, 计算机计算的结果与实际情况往往相差很大。为解决这一难题, 1981 年我们对数十台家用缝纫机进行了机械系统平衡的实验, 从而确定出对批量生产的缝纫机有效的最佳平衡块重量和安装相位。试验结果表明: 经系统平衡后的缝纫机的振动比未平衡前要降低 $1/3$ 。

机构的运动学和动力学参数的检测是机械原理实验的又一重要内容。高速精密机械对它的工作构件的运动动力性能有很高的要求, 譬如要求它的工作构件与原动件的运动之间存在确定的函数关系, 要求工作构件上的某些点有确定的工作轨迹, 要求有足够的输出功率以及较小的振动



等。机械的运动动力性能能否达到设计预定的要求, 以及如何加以改进, 往往需要用机械原理实验中的方法加以检验。图 1 是烫印模切机肘杆机构的工作简图。为保证烫印模切的质量, 对下模板的运动规律和模切压力有严格的要求, 例如要求下模板在接近工作位置时有一个近似停歇阶段 ($v \rightarrow 0$), 而此时的模切压力达到最大值。用机械优化设计方法, 选择最佳的肘杆机构结构参数, 并据此而设计的烫印模切机的运动动力性能是否达到了预定的要求, 就要用实验方法来进行测试和检验。

凸轮机构从动杆的运动规律和凸轮廓线的检测也是机械原

理实验的一个重要内容。凸轮机构在各种自动机械、印刷机械、食品机械、包装机械等中应用极为广泛。凸轮廓线的设计与制造是否正确将直接影响机械产品的使用性能和质量。要对这些机械产品进行改进设计,往往需要对原有机件中的凸轮进行精密检测。以往有些厂矿由于不了解正确的凸轮检测的基本知识及其重要性,往往凭经验来确定凸轮廓线的形状,或用精度不高的凸轮做靠模加工新凸轮,结果差之毫厘,谬以千里,由此设计制造出的机械的性能远远低于预定的要求。例如同一种双色胶印机,它们的递纸机构的工作效率高低相差30%左右,其原因之一就在于凸轮廓线的检测精度较差,设计制造的凸轮廓线不合理。

齿轮机构在各种机械中应用最为广泛。在各种机械的维修和更新设计中常常需要确定原有机件中齿轮齿廓曲线的形状和各个有关的参数,如齿轮的压力角、模数、齿高系数等。如何进行这些参数的检测也是机械原理实验中的一个内容。

了解机械原理实验的主要内容,在工程实际问题中综合运用各种测试技术,合理地安排实验方案,将能获得所研究机械的运动动力性能的实验数据。机械原理实验的各个内容之间有着紧密的联系,各部分的内容可以独立成为实验项目,但工程实际问题的解决往往是各部分内容综合应用的结果。

三、机械原理实验技术的发展

机械原理实验技术在最近若干年内得到了迅速的发展。国民经济的飞速发展,工业技术水平的不断提高,为机械原理学科提供了广泛的研究课题。现在,工程技术人员已经能根据人们的不同需求完成各种精度要求高,结构复杂,实用性强的实验测试项目。机械原理实验技术的实用前景极为广阔。

机械原理实验技术的发展主要表现在以下几个方面:

1. 试验目的

最初,机械原理实验中有相当一部分实验的目的是用以验证机械原理课程中的基本理论,或为了了解机械中机构的局部运动特性。而现在更重要的是为了全面了解机械中各机构的动态运动动力性能,为研究机械设计理论,选择最佳设计方案,改进机械工作性能提供试验依据。根据不同的具体目的,机械原理实验可分为鉴定性试验,验收性试验和研究性试验等。

2. 试验内容

初级的实验仅是单一机构在静态或低速时的简单测试,如螺旋效率实验,而现在发展到进行包括各种机构的复杂机械系统在高速状态时的综合动态性能测试。如在家用缝纫机上不仅进行了机械系统平衡实验,而且进行了挑线机构运动轨迹和主轴起动扭矩检测实验,为全面改善缝纫机性能提供了必要的实验依据。

3. 试验设备和仪表

机械原理试验最初采用的大多是简单的机械式测试仪表和设备,如弹簧秤、秒表、砝码、范成仪等,而现在机械原理实验中已广泛采用非电量电测法和光测法,采用了先进的自动化检测仪表,记录仪器以及精密、小型、灵敏的各类传感器,同时实验中还广泛采用微型计算机进行实时控制和数据采集。

南京工学院设计制造的 JC-83 型角速度角加速度实验仪和清华大学设计制造的 GD-1 型机构动态试验台就都采用了先进的 YT-2 型角速度陀螺仪进行角速度检测。GD-1 型试验台上还采用了 Z-80 型单板计算机进行数据的采集、处理、存贮、显示和打印。

武汉钢铁学院设计制造的 YC-84 型正弦机构运动参数测试台采用光电传感器检测转速,磁电式测速电机检测速度,应变

式加速度传感器检测加速度。

上海交通大学在机构的振动和平衡实验中也采用了先进的BK系列振动测试仪器。

4. 试验数据的处理

由于最初的机械原理实验比较简单,测试数据较少,因而实验数据只需经过简单的处理,用一般图表即可清楚地显示结果。现在,一次机械原理实验中常常要获得成百上千个数据和记录,因而广泛采用数理统计和数值计算的方法对大量的数据进行诸如方差分析、误差估计、相关分析、频谱分析以及曲线拟合、数值微分、数值积分等处理,以求获得满意的实验结果。由于计算工作量很大,因而这些数据处理工作大多依靠计算机进行。

机械原理实验技术目前正进一步深入发展,许多高等院校、工矿企业正密切结合当前的科研、教学需要广泛开展深入细致的研究工作。综合目前的情况,我们认为机械原理实验技术将向以下几个方向发展:

1) 进行高速机构动态综合测试。

机构在高速时的运动动力性能与低速时有显著的差异。关于这方面的理论研究工作还在进一步深入,实验研究工作也将得到迅速的发展。

2) 广泛采用微型计算机进行数据采集和实时控制。

目前有不少机械原理实验项目中已经采用了微型计算机,近几年内将会得到广泛推广。

3) 与科研、生产实际紧密结合。

机械原理实验技术的发展离不开科研、生产实际的需要,要在解决复杂机械的设计,机械动态性能的改善等实际问题中开拓机械原理实验技术发展的新路,完善机械原理实验体系。

第一章 测量误差分析和数据处理

要消除和估计测量误差的影响, 分析被测参量的变化规律和特征, 常常需要应用误差理论、概率论和数理统计、数值计算等方面的理论知识, 对机械原理实验的数据进行分析和计算。本章将结合机械原理实验数据处理和误差分析的实际需要, 对有关的理论和方法作简略的介绍。

§ 1-1 测量误差的分类

一、真值与误差

被测参数在理论上如果有确定值, 则称该理论值为真值。由于存在测量误差, 测得的实际值不可能是真值。实际测量值与真值之差称为测量误差, 即

$$\Delta x = x - u \quad (1-1)$$

式中: Δx ——测量误差;

x ——被测值的实际测量值;

u ——被测值的真值。

Δx 也称为绝对误差。显然, Δx 愈小, 测量值 x 与真值 u 愈接近, 故 Δx 能用于评估被测值大小相同时的测量精度。绝对误差 Δx 与被测值的比值称为相对误差, 即

$$\text{相对误差} = \frac{\Delta x}{u} \times 100\% \approx \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1-2)$$

相对误差可用于评估被测值大小不同时的测量精度。

二、测量误差的分类

按照测量误差的基本性质可将其分为系统误差、随机误差

(偶然误差)和过失误差三类。

系统误差: 测量系统自身的误差,在一定测试条件下,其数值与符号均不变或按一定规律变化。例如测试仪器的零点漂移、应变片的横向效应等。从理论上讲,系统误差是可以消除的,尤其是定值系统误差可以通过预先实验或分析的方法发现并予以消除。但由于变值系统误差往往难于完全消除,因而测量前应查明其原因和变化规律,测量时采取相应的措施使之减小或消除,或者对测量结果进行修正。

随机误差: 在一定测试条件下,测试数据之间无法预测的微小误差。例如测量时环境温度的波动、测量力不稳定、电磁场的干扰等种种无法预测和控制的因素综合引起的误差。随机误差无法预先消除或事后修正,而只能根据其统计规律估计其误差的分布范围。

过失误差: 由于测量过程中的错误而造成的误差。例如测量时的不正确操作,测试仪器突然失灵等造成的误差。过失误差一般误差值很大,符号不定,并往往导致错误的实验结果。在实验中应尽量避免过失误差,数据处理时应及时发现并予以剔除。

应当指出,上述三类误差在一定的条件下可以互相转化。例如在测量过程中,仪器零点的调整误差,在多次调整中表现为随机误差,而在一次调整后测量一批数据却表现为定值系统误差。测试者的估计误差一般是随机误差,但由于测试者估计方法不正确而导致的误差就可以认为是过失误差。

三、精密度、准确度和精确度

测量的精度是指测量值与被测参量真值的近似程度,它常常用测量的精密度、准确度和精确度这几个术语来表示。

精密度表示测量中随机误差影响的程度;准确度反映了测

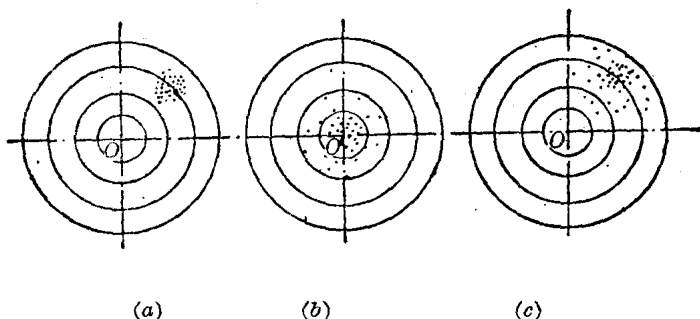


图 1-1 系统误差与随机误差对测量精度的影响

量中系统误差影响的程度；而精确度是系统误差与随机误差的综合反映。以打靶为例进行说明，见图 1-1， O 为靶心，图 1-1(a) 弹着点密集但偏离靶心，表示随机误差小，而系统误差大，故精密度高而准确度低；图 1-1(b) 弹着点分散但环绕靶心，表示系统误差小，而随机误差大，故精密度低而准确度高；图 1-1(c) 弹着点分散且偏离靶心，表示随机误差和系统误差都较大，故精密度与准确度都低，即精确度低。

§ 1-2 误差的分析与处理方法

由于测量误差不可避免，测量结果不可能绝对精确地等于被测值的真值，因此应根据测量要求对所测得的数据及其误差进行分析和处理，以期得到较理想的实验结果。

一、随机误差的估计与处理

随机误差不可能被消除。若试验数据中仅含有随机误差(或随机误差处于主导地位)，也就是说试验数据中系统误差已消除，过失误差也已剔除，或它们相对于随机误差可以忽略不计时，可以采用以下的数理统计方法，减少并评估随机误差的影响。

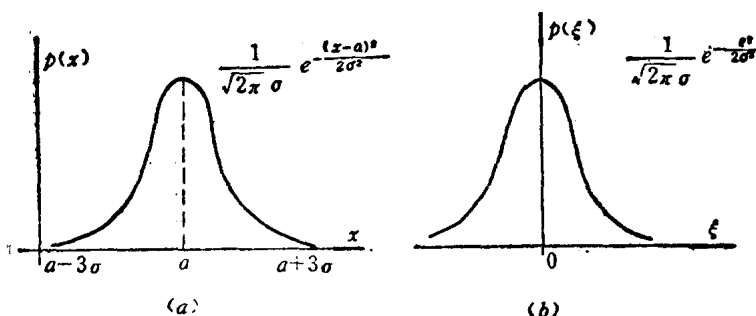


图 1-2 概率分布曲线

1. 数据总体的正态分布和随机误差的统计特性

正态分布的概率密度函数是

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} \quad (1-3)$$

式中: x ——试验数据的取值;

a ——正态分布数据的总体平均值;

σ ——正态分布数据的总体标准差。

图 1-2(a) 是正态分布曲线, 它以 $x=a$ 为分布中心, 两边的概率相等。所取的值距 $x=a$ 处愈近的数据, 其出现的概率愈大, 数据取值在距 $x=\pm 3\sigma$ 范围内的概率为 99.7%。 σ 值表示了试验数据分布的离散程度, σ 值愈小, 曲线愈高愈窄, 表明数据愈集中; 反之, 曲线低而宽, 表明数据愈分散。

随机误差服从正态分布, 它的概率密度函数为

$$p(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} e^{-\frac{\xi^2}{2\sigma^2}} \quad (1-4)$$

式中: ξ ——随机误差;

σ ——随机误差的标准差。

图 1-2(b) 是随机误差的概率分布曲线, 它与标准的正态分

布曲线具有相同的特征。

2. 仅含有随机误差的试验数据的统计特性

如果试验数据中仅含有随机误差, $\Delta x_i = \xi_i = x_i - u$, 则试验数据的概率密度函数为

$$p(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} e^{-\frac{(x_i - u)^2}{2\sigma^2}} \quad (1-5)$$

试验数据的总体平均值就是该被测参量的真值。由于实际测量时测量次数总是有限的, 无法求得被测参量的真值 u , 因此可取测量数据的算术平均值作为被测值的最近真值, 即

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (1-6)$$

式中: N ——测量次数。

设:

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (1-7)$$

式中: v_i 称为残余误差, 简称残差(离差)。

按算术平均值确定的残差有下述特性:

(a) 残差的代数和等于零

$$\sum_{i=1}^N v_i = \sum_{i=1}^N x_i - N\bar{x}$$

而

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

故

$$\sum_{i=1}^N v_i = 0 \quad (1-8)$$

(b) 残差的平方和最小

$$\sum_{i=1}^N v_i^2 = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^N x_i^2 - 2\bar{x} \cdot \sum_{i=1}^N x_i + N\bar{x}^2$$

如果 $\sum_{i=1}^N v_i^2$ 最小, 则必有