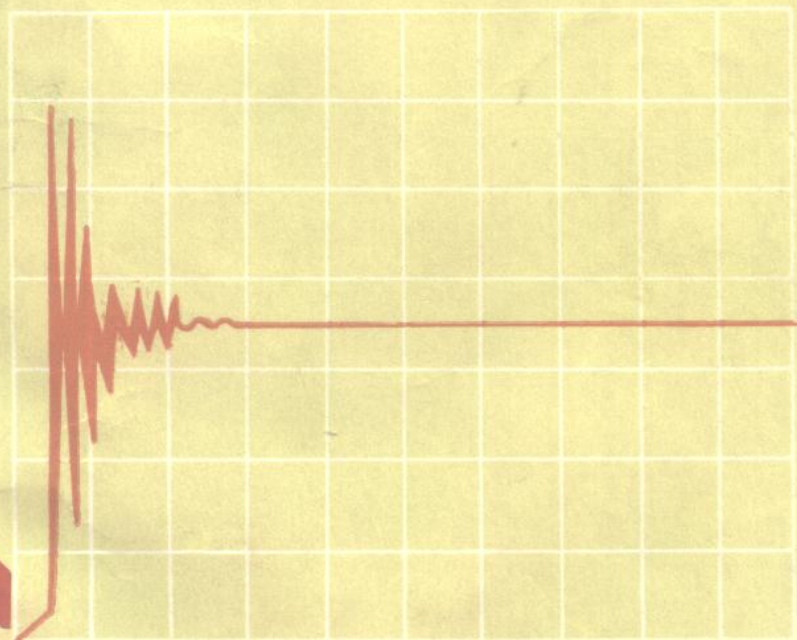


# 动态测量

[苏] B. A. 格拉诺夫斯基 著  
傅烈堂 鲍建忠 译 李 燕 校



中国计量出版社

71.4  
-482

DG61 B404

# 动态测量

〔苏〕B.A.格拉诺夫斯基 著

傅烈堂 鲍建忠 译

李 燕 校



中国计量出版社

1014697

## 内 容 提 要

本书从计量学的角度,系统地介绍了动态测量的基本概念和定义;用数学描述了计量器具的动态特性及求解动态特性曲线的方法;详细介绍了动态误差的评定和修正方法。

可供从事计量测试工作的科研人员、计量人员、工程技术人员和有关仪器仪表设计、制造单位参考,也可供大专院校有关师生参考。

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

В.А.ГРАНОВСКИЙ

《ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ》1984

### 动 态 测 量

〔苏〕В.А.格拉诺夫斯基 著

傅烈堂 鲍建忠 译

李 燕 校

责任编辑 徐 鹤

—\*—

中国计量出版社出版

北京和平里 11 区 7 号

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

—\*—

开本 787×1092/32 印张 8.875 字数 199 千字

1989 年 8 月第 1 版 1989 年 8 月第 1 次印刷

印数 1—7 000

ISBN 7-5026-0230-5/TB·198

定价 3.70 元

## 前 言

动态测量，即在动态条件下用测量器具进行的测量，在技术和科学研究工作中正在获得越来越广泛的应用。这类测量首先涉及被研究对象的物理过程发展规律的研究。因此，动态测量的作用在以下两个领域显得特别重要：首先是在有关材料结构的研究、新物质和新材料的分析与合成，研究对象在极端条件下的研究等科学领域；其次是在以建立新工艺过程和新试验机器、仪表和装置为特征的技术与生产领域。

在进行动态测量的实践中，总会产生许多迫切需要解决的问题，这就是要将其划为计量学的独立分支的原因之一。另外一个更重要的原因是，为了解决动态特性的基本问题，在测量中使用了与被测的量的物理属性无关的专用数学装置。这种情况促使将上述问题作为许多测量领域的一项共同问题来研究，并且制定出共同的解决办法。此外，它还为在各个测量领域中应用那些已在某个具体领域所取得的成果从根本上创造了可能性。

由于苏联标准委员会各研究机构、各部门的科研单位以及高等院校的教研室完成了大量的工作，近年来动态测量理论作为计量学的一个分支已趋形成。1975、1978、1981和1984年在列宁格勒举行的“动态测量”全苏讨论会又大大地促进了这个进程。动态测量工作，在其它许多国家，如：波兰、民主德国、美国、联邦德国、意大利等国，也已经展开。

鉴于动态测量问题的复杂性和重要性，美国标准局建立了动态电测量工作组，并在1974年末举行了首次全会。

动态测量问题被列入第七届（伦敦，1976）和第八届（莫斯科，1980）国际计量技术联合会（IMEKO）大会的议程，足见这一问题的重要性已为国际科技界所认识。

计量学家和仪器制造学家们所作出的上述努力，终于迎来解决测量当中许多动态特性问题的大好局面。因此，对积累的知识和经验进行归纳并使之系统化，已势在必行。同时也应考虑到在现代测量技术中出现的这样一种要求：动态测量的计量保证作为一项关系到各个方面的综合问题来加以研究。

这项工作是在该方面所做的初步尝试，期望通过分析各种问题来达到最终目的，即保证各领域中测量的统一和所要求的准确度。

本书的论题十分广泛，它不仅包括计量学方面的内容，而且特别关系到解决计量问题所采用的数学方法，这些数学方法通常又是与邻近学科不可分割的，自动控制理论，理论无线电工学等。限于篇幅，并不是所有的问题都能得到足够全面的探讨。

本书归纳了国家标准委员会，仪器制造、如自动化工具和控制系统部以及其它的仪器制造部门的许多工业企业和高等院校中已经取得的和正在开展的工作成果。

动态测量的计量保证作为一种科学方向是在Д.И.门捷列夫全苏计量科学研究院提出的，参与这项工作的有В.О. Арутюнов, В.С. Пеллинц, Д.Ф. Тартаковский, К.П. Широков。本书中的一系列工作就是同他们一起完成的。作者特别感谢К.П.Широков，没有他的参加和支持，本书是难以完成的。

**О.А.Кудрявцев**参与解决动态测量误差的评定问题,  
**Ю.С.Этингер**协助编制计算机程序和整理计算结果, **Т.**  
**Н.Сира**对某些问题提供有益的意见, 作者谨致谢意!

作 者

## 引 言

当前, 计量学和测量技术已发展到了从恒定的量(对象性质和状态的特征)的观测转向变化的量(过程, 即对象性质和状态规律性变化的特征)的观测。这一转变是由测量工作的两个基本发展趋势所决定的。

第一个趋势是“横向”的发展, 或者说是精密测量(具有评定准确度之值的测量)应用领域的扩大, 特别是对于: 零件在制造过程中各项参数的工艺控制; 技术装置在其工作过程中的操作控制; 新技术样品的试验, 其中包括非稳态试验; 新的物理对象和现象的研究; 在极端条件下对象品质的研究。

第二个趋势是“纵深”的发展, 即提高测量准确度, 以满足研究越来越精细的自然现象和建立愈加完善的技术装置的迫切要求。与此同时, 原先“恒定”的量竟成为变化的量了。

对动态测量理论问题的研究, 是以电测技术, 特别是示波技术的需求为起点的, 首先要提到的是上世纪80~90年代 А.Корню 和 А.Блондель 关于示波器测量元件动态的著作。然后还应该指出 Е.Орлих, Х.Буш, Вертхайм-Соломосон, Х.Целлих, В.Хоффман, Г.Д.Робисон 等人的著作。在这些著作中解决了测量问题, 但是对于计量学中的动态问题并没有作为独立的问题来提出。现代动态测量理论的发展应以 А.Н.Крылов 学术论文的发表作为起点<sup>(1)</sup>。这部著作在计量学问题的提法上堪称经典, 它得出的结果在今天仍然没有失去其意义。А.А.Харкевич 的著作具有奠基的意义。

动态测量理论在下列等人的著作中获得了进一步的发展: Е.И.Баранчук, Л.А.Бибер, М.А.Быховский, В.Г.Васильев, В.А.Волконский, А.С.Немировский, Р.Я.Сыропятова, Р.Р.Харченко, Я.Э.Цыпкин, Н.А.Чехонадский, Ю.М.Элькин, А.М.Яглом。此

外，国外的一些学者如 H.Dallmann, G.Keinath, Marxen, A.Palm, H.Zöllich 等对此也作出了自己的贡献。

近年来又相继出现了下列等人的著作：А.М.Азизов, В.Ф.Бакланов, Д.И.Башалейшвили, М.Д.Бренер, Н.Ф.Гонек, А.Н.Гордов, Ю.П.Дробышев, Н.А.Желудева, Г.И.Кавалеров, А.Г.Козачок, Е.Д.Колтик, П.П.Кремлевский, В.В.Леонов, С.М.Мандельштам, В.С.Пеллинц, Г.С.Скорик, Ю.Н.Солодкин, Г.Н.Солопченко, Д.Ф.Тартаковский, О.Н.Тихонов, В.М.Хрумало, Н.И.Хургин, И.Б.Челпанов, Б.А.Школьник, В.П.Яколев 等。

如果把关于自动控制系统的非稳态、无线电技术装置中的瞬变过程、通信系统中的信号变换等研究工作都考虑进去，那末可以列出比上述更长的名单。这反映出动态测量理论的下述特征：它处在一系列邻近学科的交会处，因而广泛地借用了这些学科的方法。所以，测量变换器和记录仪器准确度的研究，以及根据已知的部件特性来确定复杂测量装置的动态特性，都是通过系统分析方法实现的。同时，依据测量器具的特性（作为物理对象）以及所要求的准确度，可以把它当作一个线性或非线性系统，模拟或分立系统，具有集中参数或分布参数的系统加以研究。相应地，在研究方法上可以使用各种不同的数学手段：线性和非线性微分、差分方程，普通的微分方程和偏导数方程，连续和离散变换，积分学和矩阵学等。

作为计量学的一个分支，动态测量的上述特征一方面保证它从邻近领域源源不断地获得新的观念、方法和结果，因而是十分有用的。另一方面它要求特别仔细地分析具体测量的任务，具体实验的条件，以便选择相应的方法与手段。从这个意义来说，它对于从事测量工作的实验人员，以及对致力于改进已有的并制定新的计量问题解决方法的研究人员，提出了更高的要求。

# 目 录

|                                        |         |
|----------------------------------------|---------|
| 前言 .....                               | ( 1 )   |
| 引言 .....                               | ( i )   |
| 第一章 一般问题 .....                         | ( 1 )   |
| 1.1 动态测量诸问题 .....                      | ( 1 )   |
| 1.2 基本概念 .....                         | ( 4 )   |
| 1.3 输入信号和被测的量 .....                    | ( 7 )   |
| 1.4 动态测量的误差 .....                      | ( 17 )  |
| 1.5 测量器具动态的数学描述 .....                  | ( 19 )  |
| 第二章 测量器具的动态性能 .....                    | ( 28 )  |
| 2.1 动态测量器具的模型及其特性 .....                | ( 28 )  |
| 2.2 动态特性及其分类 .....                     | ( 46 )  |
| 2.3 动态特性间的相互关系 .....                   | ( 49 )  |
| 2.4 测量器具动态特性曲线的规范化 .....               | ( 55 )  |
| 2.5 举例：电学量、力学量和热学量的动态测量<br>器具的模型 ..... | ( 61 )  |
| 第三章 测量器具动态特性的确定 .....                  | ( 70 )  |
| 3.1 测量器具动态性能确定的一般特性 .....              | ( 70 )  |
| 3.2 试验信号及其特性和描述 .....                  | ( 90 )  |
| 3.3 借助特性试验信号求解动态特性的方法 .....            | ( 110 ) |
| 3.4 借助非特性确定试验信号求解动态特性的方法 .....         | ( 119 ) |
| 3.5 借助伪随机试验信号求解动态特性的方法 .....           | ( 138 ) |
| 3.6 动态特性的评定误差 .....                    | ( 140 ) |
| 3.7 举例：电量、机械量和热学量测量器具动态<br>特性的确定 ..... | ( 143 ) |

|                                              |       |
|----------------------------------------------|-------|
| 第四章 动态测量误差及其评定 .....                         | (159) |
| 4.1 动态测量误差的分量及其分类、误差分量的<br>总和 .....          | (159) |
| 4.2 恒量的动态测量误差 .....                          | (172) |
| 4.3 测量变换的动态误差 .....                          | (183) |
| 4.4 记录测量的动态误差 .....                          | (197) |
| 4.5 动态测量误差的修正 .....                          | (206) |
| 4.6 举例: 示波器误差、磁化曲线记录误差和冲击<br>加速度信号变换误差 ..... | (218) |
| 第五章 动态测量统一的保证问题 .....                        | (228) |
| 5.1 误差不超过规定值的动态测量器具的选择 .....                 | (228) |
| 5.2 单位量值向动态测量器具的传递 .....                     | (237) |
| 5.3 对用于检验动态测量器具动态特性的测量器具<br>特性的要求 .....      | (250) |
| 5.4 对确定测量器具动态特性准确度的要求 .....                  | (259) |
| 5.5 举例: 可变压力、最大加速度和温度脉动测量<br>统一的保证方法 .....   | (262) |
| 参考文献 .....                                   | (269) |

# 第一章 一般问题

## 1.1 动态测量诸问题

对动态测量可能有两种观点：一种是计量学者的观点（他们关心的是具体领域内测量的计量保证），另一种是仪器制造者的观点（他们从事着对测量的技术保证）。下面将讨论测量的计量学问题，但是也要注意，仪器制造者对所讨论的大部分问题的解决方法同样是有兴趣的。

测量的计量保证一般的目的是要在现代科学技术所必须的准确度水平内达到测量统一。因此出现了以下一些基本课题：（1）计量单位量值从基准器传递到工作用测量器具；（2）测量器具的动态特性曲线的规范化和确定；（3）测量误差的评定和修正。可见，在给定的统一性高度上说，动态测量并没有给研究人员提出新的计量学课题。但是目前已知的一些课题的内容和解决方法却有其独特性。

将计量单位量值传递到测量器具的不同处是：必须传递的不只是被测量的计量单位量值，而且还有时间的计量单位量值。时间单位量值的传递方法是众所周知的，而且也是十分准确的。但是必须考虑到确定时间时出现的误差分量。

更为复杂的是被测的量的单位。假如测量器具是静态的，那末计量单位量值可由相应的基准传递，而且这种传递关系也反映在现有的检定系统中。如果测量器具不能在静态下分度，那末只得特地为其建立相应的标准测量器具和检定

系统。这些检定系统中的原始测量器具应复现的计量单位，其量值必须与相应的静态计量基准器所复现的单位相一致。要使集中复现单位达到技术经济合理，可建立专用基准器。例如对冲击运动下的峰值加速度测量器具的作法就是这样的（见全苏国家标准 ГОСТ 8.137-75）。

为选择测量器具，评定测量误差和取得其结果，必须知道动态特性曲线。有关动态特性曲线的信息应列入规范化技术文件。但是直至不久前，这些特性曲线规范化问题在国内（和国外）的实践中都解决得各不相同，所以往往不能令人满意。例如，为记录式电测仪表规定的示值判读时间，对于正确使用仪表来说是明显不够的。

近些年来，正在努力改变这种状况。实施了一系列有关规定模拟式和分立式测量器具动态特性曲线的苏联标准和方法指导，经互会和国际法制计量组织也准备了文件草案，拟定了一系列局部的标准文件。

根据测量器具对已知试验信号的反应来确定动态特性曲线。尽管各个测量领域中的试验信号源各不相同，但是解决这一课题的方法学和理论还是相同的。动态对象的识别法，在这里得到广泛应用。考虑到计量学的一些特点，诸如：确定动态特性曲线和其规范化间的紧密联系<sup>[4]</sup>，优先采用确定的试验信号；必须考虑测量目的和评定测量结果的准确性等等，这些方法还必须作某些修改。

在确定瞬变、脉冲和频率特性曲线时，必须承认直接法是基本的方法。因为分别用阶跃、三角脉冲和正弦试验信号，就可以得到上述特性曲线。用直接法的装置可以在所研究测量器具的输出端上取得直接代表所求特性曲线的信号。如果需要用分析式表示它，那么这就可用已知的近似法得到。这里原则上可分为两种情况：

(1) 试验信号发生器和信号参量检验装置是比较简单的,也是比较容易得到的(例如,标准电信号发生器、示波器等)。在这种情况下,为了一致地确定具体型号测量器具的动态特性曲线,需要的只是恰当的测量方法和实验数据处理。

(2) 如果试验信号发生器很复杂,且适用于测定和检验信号参量的手段,又不是成批生产的。在这种情况下,测量器具动态特性曲线的确定任务,原则上说是复杂的。不论采用什么方法来解决这一任务,都需要有成套的装置与设备。例如,为确定压力测量变换器的特性曲线;要用激波管作阶跃作用的发生器。激波管中的压力随时间变化的规律是基于空气动力学规律的基础上确定的。为检定整批的测量器具,或者只需建立必要(数)量的激波管,这未必好,或者有必要数(量)的激波管甚至在单个激波管的条件下来研究建立特别快速作用变换器。然后直接用它来确定工作变换器的特性曲线,或者用它来确定特制标准发生器输出端上的信号特性曲线。在后一种情况下,可以构成动态特性曲线确定的某种分级结构。

动态特性曲线间接确定法要比直接确定法更为复杂。根据测量器具的已知的非特性信号和相应输出信号来确定全特性曲线的课题是按米。阿达麦尔未经改正就提出的,需要进行调整<sup>[71]</sup>。利用演绎的信息可满足 A.H. 吉洪诺夫的修正条件。

间接法中最常用的是特殊信号发生器产生的标准图形试验信号。为研究和鉴定这种信号发生器,需要比被研究仪器更为快速作用的测量器具。在实现间接法时,接近于所探求的被研究测量器具模型的准数,应该以该测量器具所测的参量(泛函数)为依据。

在确定测量器具动态特性曲线时出现的、属于计量学课题的有下列各项：直接法准确度评定；确定对试验信号时间（频谱）特性的要求；确定其特性和典型试验信号所需的复现准确度；制订和修改识别法（实验数据处理法）；对用于研究和鉴定测量器具的器具确定其计量学特性的要求；制订将实验求得特性曲线换算成其它特性曲线的换算方法；制订测量器具的准数；确定这些特性曲线所需的准确度等。

## 1.2 基 本 概 念

在讨论动力学基本概念时自然会从“动态测量”概念开始，但是还必须先提出有关“测量”概念的总的观念。

测量是为了研究这些或那些多少是比较复杂的物质对象。这些对象都具有特性并处于这种或那种状态下，且能在不同状态下产生各种过程（状态改变）。

以常用单位和数量表示的物质对象的特性和状态或过程的参量都必须进行测量。这些参量称为物理量<sup>[45]</sup>。

测量时，对象作用于测量器具并引起其响应，从中取得被测的量的信息，即获得量值。

从测量获得的量值只是它的近似评价，因为，绝对准确的测量基本上是不可能的。测量时所需求的量值总是带误差的，而且要准确地确定它也是不可能的。既然被测的量的真值成为未知数，通常确定的并不是测量结果的实际误差，而是所得量值的不确定程度（或者是不确定度）。存在误差的区域极限或者可能有的误差分布函数的参量中的一个参量（例如测量结果的均方差）用来评定不确定度。

根据提出的任务，测量时测量器具是在动态下使用的，这样的测量即应理解为动态测量<sup>[56]</sup>。也就是说，动态是以测量器具输出变化信号为特征的。虽然整个组合测量器具中

只有某一部分的状态是动态的，但这个组合测量器具（装置或系统）的状态也认为是动态的。通常的定义，可用如下办法来区分有关的被测的量、测量器具的输入信号和输出信号的性质状况<sup>●</sup>（=为恒定的，~为变化的）：

|           |     |     |
|-----------|-----|-----|
| 测量.....   | 静态  | 动态  |
| 被测的量..... | = = | = ~ |
| 信号：       |     |     |
| 输入.....   | = ~ | ~ ~ |
| 输出.....   | = = | ~ ~ |

就其本质来说，所采用的定义与文献[82]中提出的定义是接近的，不过它的基础是必须计算测量器具的动态性质。但是与其不同的优点是在测量前就可以演绎地判定它是属于哪类的。不同于文献[1]中所介绍的定义（动态测量是在物理量变化过程中对其进行的测量），这里所用的定义包括了第三种情况。这第三种情况按提出的测量任务的内涵来说，也无异于第四种情况。

根据所用定义，测量包括以下一些测量任务：确定随时间变化的量的连续值；测量带有变换或记录交变信号一次实现之量的参量（例如，一次脉冲幅度）；恒量的动态测量（例如测量稳定的温度同时将测量器具的输出信号外推到稳定值）。

在计量学方面，动态测量本身标志着由标量测量过渡到矢量测量（一般是在无限维的情况下），从带数字形式结果的测量过渡到带函数形式结果的测量，从为了确定固定量所作的测量过渡到为确定一个量依赖于另一个量——时间的测量。因此，在法定的测量分类（ГОСТ 16263-70）中，动态

●意思是讲，观察时间间隔内，量和信号的状态性质。

**测量可列为对所关心的量和时间的共同测量。**

由于这些测量本身就是随时间演进的一个过程，所以必须确定其特性曲线，其中的某些与任何测量都有关。

测量器具与研究对象相互作用的时刻就可认为是测量的开始。获得被测之量的评定和测量误差的评定结果，就是测量结果。

测量本身要包括两个阶段：实验数据的观测和处理。所以观察开始也就是测量开始，最后以示值记录为结束。必须考虑到的是，包括任务确定和测量器具选择（设计）在内的准备阶段通常先于测量。

测量器具对不断变化作用的反应能力可反映出它的动态特性。根据作用类别（即根据应用观点），可根据与被测的量（输入信号的信息参量）、影响量、输入信号的非信息参量和干扰的关系来讨论测量器具的特性。动态特性可用动态特性曲线来表示。动态特性曲线与测量器具的计量学特性曲线有关，因为动态特性要影响到这些测量器具所作测量的结果和误差。

从单次脉冲峰值的例子可容易地说明有关将动态测量划分为独立一类的上述情况的特点。假定一开始讲到利用以电压单位分度的伏特表测量脉冲电压。假定脉冲伏特表本身是一简单的测量手段，即其中不含有其它测量手段，那末根据以上给定的定义，在测量单次脉冲峰值时的伏特表的状态和测量本身都是静态的。我们进一步地讨论峰值冲击加速度的测量。测量装置可以制成各种各样。如果该装置本身是一个直接用加速度单位分度的仪器，那末情况并不与脉冲电压测量有什么不一样。如果使用的装置由“加速度-电压”测量变换器和脉冲电压表组成，那就是另一回事了。既然测量时变换器处于运动状态，那末整个装置的状态必须认为是动

态的。最后可以进行测量峰值冲击加速度和记录变化着的加速度的整个曲线。这里，测量装置除变换器外，还有记忆式电子示波器。这种方案与前面的相似，差别只是组成测量装置的两个测量器具是在动态下使用的。因此，峰值冲击加速度测量根据其<sup>26</sup>所用测量器具，可以是静态的，也可以是动态的。这主要取决于测量器具状态特性。

所举例子揭示出确定这些测量时所持态度的实质。这种态度并不包含在对测量的“内在”观点（设计人员的观点）中，而是包含在“外部”观点（使用人员的观点）中。

最后还应提一个概括性的建议。动态测量比起静态测量要复杂的多。必须承认简化测量器具使用方法的努力是理所当然的。个别情况也有从利用记录式测量器具和复杂的观测结果处理方法来测量具体的过程参量的测量，过渡到用误差不超过规定值的指示式测量器具的测量，这是该测量领域测量技术向更高阶段发展的过渡。这种过渡只需要详细分析测量任务（判断输入信号非信息参量的可能变化范围、测量条件的稳定程度），此外还要求改进测量器具的结构（降低对非信息参量和影响量的灵敏度）。因此，在处理测量任务和设计测量器具时，问题解决得越多，那末对于使用人员（而不是对仪器）来说，就更简单了，因而测量也就更完善。

### 1.3 输入信号和被测的量

研究对象和测量器具的相互作用，引起在测量器具输入端上出现载有被测的量信息的信号。一般说，“输入信号”和“被测的量”的概念是不一致的<sup>[56]</sup>。它们的区别促使更深刻地揭示这些概念的内涵。首先，我们要论述“被测的量”。

如 1.2 节中指出，物理量是要测量的，即“在定性方