

张改慧 李慧敏 谢石林 编著



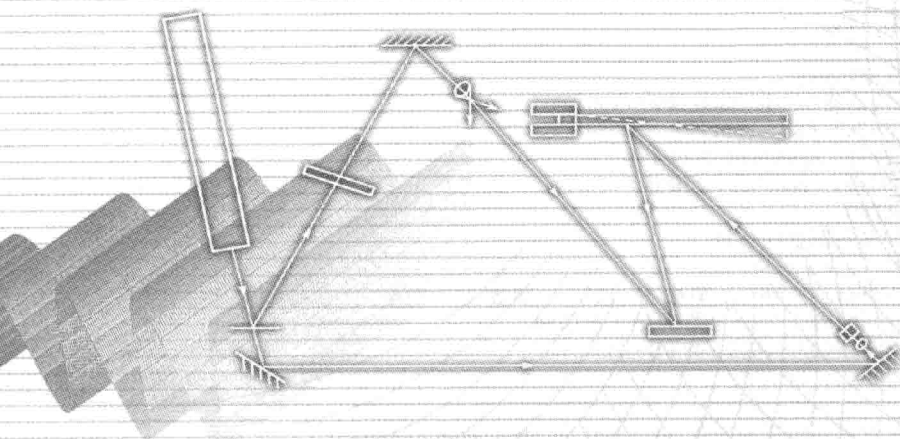
西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



西安交通大学 本科“十二
“985”工程三期

振动测试、光测与电测技术 实验指导书

张改慧 李慧敏 谢石林 编著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书分别介绍了振动测试技术、光测技术和电测技术的相关知识与实验技术和方法。全书共三部分:第一部分阐述有关振动测量的基本概念、振动测量传感器的种类及其工作原理和使用方法、激振器技术,给出了振动系统频率响应函数测量及机械结构特性参数测量的多种激励与识别方法等实验;第二部分介绍了光弹性法的基本原理、分类及适用范围,光弹仪的种类、构造、工作原理与使用方法,现代光测技术常用方法的分类及特点,给出了平面、三维、贴片光弹等实验;第三部分介绍了电阻应变片的基本构造、工作原理、种类及其性能指标,电阻应变仪的种类及工作原理,电阻应变片灵敏度的测定、结构在弯扭组合载荷下主应力和内力测定等实验。

本书可为力学、航天航空、机械、能动等专业本科生和研究生多门课程提供实验指导,亦可作为本科生、研究生论文实验和从事振动及强度测试工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

振动测试、光测与电测技术实验指导书/张改慧,李慧敏,谢石林编著. —西安:西安交通大学出版社,2013.12
ISBN 978-7-5605-5813-4

I. ①振… II. ①张…②李…③谢… III. ①振动测量-实验-高等学校-教学参考资料②光测法-实验-高等学校-教学参考资料③电测法-实验-高等学校-教学参考资料
IV. ①TB936-33②0348.1-33③TM93-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 268110 号

策 划 程光旭 成永红 徐忠锋

书 名 振动测试、光测与电测技术实验指导书
编 著 张改慧 李慧敏 谢石林
责任编辑 杨 璠 毛 帆

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)
网 址 <http://www.xjtpress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315 82669096(总编办)
传 真 (029)82668280
印 刷 陕西奇彩印务有限责任公司

开 本 727mm×960mm 1/16 印张 12.125 字数 218 千字
版次印次 2014 年 3 月第 1 版 2014 年 3 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5605-5813-4/TB·72
定 价 25.00 元

读者购书、书店添货,如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82664954

读者信箱:jdlgy@yahoo.cn

版权所有 侵权必究

编审委员会

主 任 冯博琴

委 员 （按姓氏笔画排序）

邓建国 何茂刚 张建保 陈雪峰

罗先觉 郑智平 徐忠锋 黄 辰

教育部《关于全面提高高等教育质量的若干意见》(教高〔2012〕4号)第八条“强化实践育人环节”指出,要制定加强高校实践育人工作的办法。《意见》要求高校分类制订实践教学标准;增加实践教学比重,确保类专业实践教学必要的学分(学时);组织编写一批优秀实验教材;重点建设一批国家级实验教学示范中心、国家大学生校外实践教育基地……。这一被我们习惯称之为“质量30条”的文件,“实践育人”被专门列了一条,意义深远。

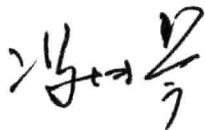
目前,我国正处在努力建设人才资源强国的关键时期,高等学校更需具备战略性眼光,从造就强国之才的长远观点出发,重新审视实验教学的定位。事实上,经精心设计的实验教学更适合承担起培养多学科综合素质人才的重任,为培养复合型创新人才服务。

早在1995年,西安交通大学就率先提出创建基础教学实验中心的构想,通过实验中心的建立和完善,将基本知识、基本技能、实验能力训练融为一炉,实现教师资源、设备资源和管理人员一体化管理,突破以课程或专业设置实验室的传统管理模式,向根据学科群组建基础实验和跨学科专业基础实验大平台的模式转变。以此为起点,学校以高素质创新人才培养为核心,相继建成8个国家级、6个省级实验教学示范中心和16个校级实验教学中心,形成了重点学科有布局的国家、省、校三级实验教学中心体系。2012年7月,学校从“985工程”三期重点建设经费中专门划拨经费资助立项系列实验教材,并纳入到“西安交通大学本科‘十二五’规划教材”系列,反映了学校对实验教学的重视。从教材的立项到建设,教师们热情相当高,经过近一年的努力,这批教材已见端倪。

我很高兴地看到这次立项教材有几个优点：一是覆盖面较宽，能确实解决实验教学的一些问题，系列实验教材涉及全校 12 个学院和一批重要的课程；二是质量有保证，90%的教材都是在多年使用的讲义的基础上编写而成的，教材的作者大多是具有丰富教学经验的一线教师，新教材贴近教学实际；三是按西安交大《2010 版本科培养方案》编写，紧密结合学校当前教学方案，符合西安交大人才培养规格和学科特色。

最后，我要向这些作者表示感谢，对他们的奉献表示敬意，并期望这些书能受到学生欢迎，同时希望作者不断改版，形成精品，为中国的高等教育做出贡献。

西安交通大学教授
国家级教学名师



2013 年 6 月 1 日

Foreword 前言

实验力学是力学研究领域一个重要组成部分。“振动测试技术”、“光测技术”、“电测技术”及“试验模态分析”是实验力学的主要课程,也是工程力学专业本科生的主要专业基础课程。早在 20 世纪 70 年代,西安交通大学工程力学系就开设了振动测试技术、光测技术和电测技术课程,并于 1982 年出版了《机械振动与冲击测试技术》教材。经过多年的教学与实践,结合学校对实验教学的要求和学生综合素质、能力的培养及工程技术的需求,编写了这本《振动测试、光测与电测技术实验指导书》。全书分为三个部分:“振动测试技术”部分介绍了用不同传感器测量各种振动过程位移、速度、加速度和力的振动幅值及频率方法,用经典及现代实验技术和方法测量结构频率响应函数和固有特性参数,传感器及测量系统标定技术等;“光测技术”部分主要包括光弹性材料条纹值和应力集中系数测定、实验平面光弹性实验、三维光弹性实验、贴片光弹法实验、全息照相实验、全息干涉二次曝光法测定悬臂梁挠度实验等;“电测技术”部分主要实验内容包括电阻应变片的粘贴技术、电阻应变片灵敏系数的测定、电阻应变片横向效应系数的测定、电阻应变片在电桥中的接法以及动态应变的测量等。学生通过教学实践操作,可以进一步理解和巩固课堂讲授的基本知识和实验方法的基本原理,掌握有关仪器设备的选择、使用方法和实验技术细节,并具备一定的实验技能,为独立解决工程实际中的振动及应力、应变测量、新产品设计、故障诊断等问题打下坚实的基础。

本书是一本以介绍振动测试、光测及电测实验方法为主的书籍,是配合实验力学主干课程教学内容和实验要求编写的实验指导书。全书有振动测试实验 15 个,光测实验 15 个,电测实验 8 个。实验类型有基础性、综合型、设计性和创新性 4 个层次,可为力学、航天航空、机械、能动等专业本科生、研究生多门课程提供实验指

导。本书除了供教学使用之外,亦可作为本科生、研究生论文实验和从事振动及强度测试的工程技术人员参考用书。

本书是由西安交通大学工程力学系张改慧、李慧敏和谢石林共同编写而成的。在编写过程中参考了由李方泽、曹树谦、李德葆、胡时岳、倪振华、张如一老师主编的书籍和江苏东华及丹麦 B&K 公司的技术资料 and 网上相关资料。限于作者水平,书中可能存在不足之处,请读者予以批评、指正。

Contents 目录

第一部分 振动测试技术

第一章 振动测量概述	(002)
第一节 振动测试方法及分类	(002)
第二节 传感器与测量系统的主要特性参数	(003)
第三节 振动测量的基本内容	(005)
第四节 机械振动测量传感器	(006)
第五节 激振设备	(023)
第二章 振动测量实验	(039)
实验一 机械振动基本参数测量	(039)
实验二 用强迫振动法测量单自由度系统固有频率和阻尼比	(042)
实验三 用自由衰减法测量单自由度系统固有频率和阻尼比	(046)
实验四 用共振法测量多自由度系统各阶固有频率及振型	(049)
实验五 用敲击法测量结构的固有频率	(052)
实验六 冲击运动测量	(054)
实验七 用共振法测量简支梁的固有频率、阻尼比和振型	(059)
实验八 传感器测量系统的校准	(064)
实验九 用正弦扫频、随机和敲击激励测量简支梁的频率响应函数	(068)
实验十 用锤击法测量简支梁的模态参数	(074)
实验十一 用线性扫频法测量简支梁的模态参数	(082)
实验十二 用随机激励法测量简支梁的模态参数	(085)
实验十三 用不测力模态分析法测量简支梁的模态参数	(088)
实验十四 圆板各阶固有频率及主振型的测量	(092)
实验十五 附加质量对系统固有频率的影响	(095)

第二部分 光弹性测试技术

第一章 光弹性测试概述	(098)
第一节 光弹性法	(098)
第二节 光弹仪简介	(101)

第三节 现代光学测试技术·····	(105)
第二章 光弹性测试实验·····	(108)
实验一 光弹仪的构造及光学效应·····	(108)
实验二 光弹性材料条纹值和应力集中系数的测定·····	(111)
实验三 平面光弹性实验·····	(113)
实验四 三维光弹性实验·····	(114)
实验五 环氧树脂光弹性模型制作·····	(116)
实验六 贴片光弹法实验·····	(118)
实验七 全息照相实验·····	(120)
实验八 全息干涉二次曝光法测定悬臂梁挠度实验·····	(123)
实验九 激光散斑法测金属的弹性模量·····	(125)
实验十 云纹干涉法测纯弯曲梁的正应力分布·····	(129)
实验十一 认识光纤干涉仪·····	(132)
实验十二 光强调制型光纤位移传感器测量位移·····	(135)
实验十三 光的等厚干涉现象与应用·····	(138)
实验十四 动态光弹实验·····	(143)
实验十五 利用数字图像相关法测量材料的弹性常数·····	(146)
 第三部分 电阻测试技术	
第一章 电阻测量概述·····	(150)
第一节 电阻应变片·····	(152)
第二节 电阻应变仪·····	(156)
第二章 电阻测量实验·····	(160)
实验一 电阻应变片的粘贴·····	(160)
实验二 电阻应变片灵敏系数的测定·····	(162)
实验三 电阻应变片横向效应系数的测定·····	(165)
实验四 电阻应变片在电桥中的接法·····	(167)
实验五 动态应变的观测·····	(169)
实验六 偏心拉伸(拉、弯组合)内力测定 ·····	(172)
实验七 薄壁圆筒受弯、扭组合载荷时内力测定 ·····	(176)
实验八 薄壁圆筒弯扭组合主应力测定·····	(181)
 参考文献·····	(183)

第一部分 振动测试技术

第一章 振动测量概述

振动测试技术是一门集振动理论、机械、电子线路、数据处理等为一体的多学科性学科,已成为解决大型、精密及复杂工程振动问题的主要手段。作为动力学的一个分支,振动测试技术是以振动理论为基础,用实验手段分析和解决工程振动问题,其工程应用领域非常宽阔。

第一节 振动测试方法及分类

振动测量方法按物理过程可分为机械法、光测法和电测法三类。

1. 机械法

机械法是利用杠杆传动或惯性接收原理记录振动信号的一种方法,此法常用的仪器有直接式(手持式)振动仪和盖格尔振动仪。这类仪器能直接记录振动波形曲线,便于观察和分析振动的幅值大小、基波频率及主要的谐波分量频率等参数。它们具有使用简单、携带方便、不需要消耗动力、抗干扰能力强等优点,但由于其灵敏度低、频率范围窄等缺点,这类仪器在工程中使用得愈来愈少。

2. 光测法

光测法是将机械振动转换为光信号,经光学系统放大后进行记录和测量的方法。常用的仪器有读数显微镜、激光单点测振仪、激光多普勒扫描测振仪等。激光测量方法具有精度高、灵敏度高、非接触、远距离和全场测量等优点,已成为特殊环境及远距离测量中很有发展前途的一种方法。

3. 电测法

电测法是通过传感器将机械振动量(位移、速度、加速度、力)转换为电量(电荷、电压等)或电参数(电阻、电容、电感等)的变化,然后使用电量测量和分析设备对振动信号进行分析。电测法是目前应用最广泛的方法,与机械法和光测法相比,它具有以下明显优点:

(1)具有较高的灵敏度、较宽的频率范围和较大的动态范围,不仅能满足一般稳态振动过程的测量,也能适应持续时间极短的冲击过程测量。

(2)传感器类型很多,可满足不同测试环境、不同振级大小、不同测试结构的振动测量需求。

(3)易于实现多点同时测量和远距离遥控测量,电测信号易于检测、记录、保存和进一步分析处理。

随着微机械加工技术、电子技术和数字技术的发展,传感器的品种越来越多,功能更强的测试仪器和动态信号处理设备不断涌现,振动电测技术无论在环境振动测量、结构动力特性试验方面,还是在机械故障诊断和振动控制等方面,都得到广泛的应用和发展。

第二节 传感器与测量系统的主要特性参数

传感器与测量系统的技术指标是它们技术性能的特征,也是选择测量系统的主要依据。精确确定这些指标,对保证测量结果的精度及可靠性非常关键。传感器与测量系统的主要技术指标如下所述。

一、灵敏度

灵敏度是指传感器或测量系统的输出信号(可以是机械的、光的或电的信号量)与输入信号(被测信号的位移、速度、加速度或力)的比值,灵敏度是选择测量系统的重要依据,测量系统灵敏度越高,分辨率也就越高,但可测振级范围越小。选择测量系统灵敏度时,应根据现场振动量级进行选取,同时还要考虑该灵敏度下的信噪比。

二、横向灵敏度

传感器的横向灵敏度表示它对垂直于测量主轴方向运动的敏感程度。当有单位横向运动输入时,传感器输出信号的大小就代表其横向灵敏度。一般情况下,横向灵敏度用单位横向运动输入时传感器输出信号值与传感器主轴方向灵敏度值之比的百分数来表示。

三、动态范围(线性范围)

动态范围是指传感器或测量系统的灵敏度随输入信号幅值的变化量不超出某一给定误差限的最小输入和最大输入之间的幅值变化范围(如图 1-1-1 所示),或者指传感器和测量系统的输出信号与输入信号维持线性关系的输入信号幅值允许变化范围(如图 1-1-2 所示)。动态范围越大,说明测量系统对幅值变化的适

应能力越强。传感器动态范围的大小受其结构形状、材料性能及非线性行为等因素限制,因此,在选用传感器进行测量时,必须满足传感器自身动态范围要求,否则会造成传感器的损坏,或测量结果出现严重畸变,从而达不到测量要求。

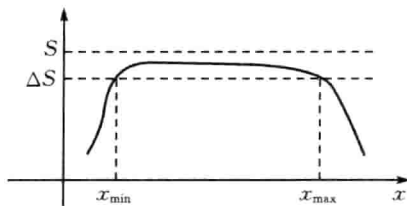


图 1-1-1 测量系统的动态范围定义一

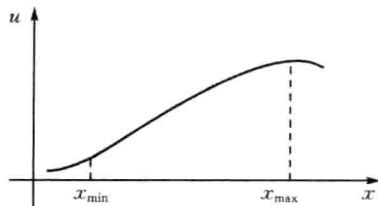


图 1-1-2 测量系统的动态范围定义二

四、频率特性范围

频率特性范围是指传感器或测量系统的灵敏度随频率的变化量不超出某一给定误差限的频率范围(如图 1-1-3 所示)。频率范围的两端为频率下限和频率上限。如果传感器或测量系统的下限频率可以扩展到零,则称该测量系统具有零频率响应或静态响应。这种系统可以用来测量静位移、常力或慢变的冲击过程。

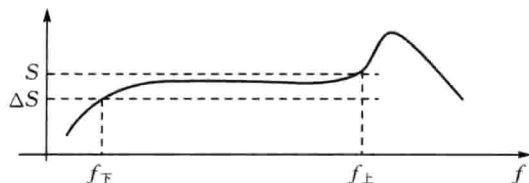


图 1-1-3 传感器与测量系统的频率特性

测量系统的频率范围不仅取决于机械接收部分的频率特性,同时还取决于机电变换部分和测量电路的频率特性。此外,传感器的安装条件也影响频率上限。频率范围是测量系统的重要特性参数。在选择测量系统时,首先要考虑频率范围,若测量的振动信号频率超出测量系统的使用频率范围,测量结果将产生重大误差,造成频率失真。

五、相位特性

相位差是指在简谐机械量输入时,传感器或测量系统的同频率输出信号与输入信号之间的相位角之差。在振动测量中,为了使测量的波形不产生畸变,要求传

感器或测量系统在测量信号的频率范围内,其输出信号与输入信号之间同相或反相,或者相位差随频率变化成线性关系。

六、附加质量与附加刚度

在进行振动测量时,传感器类型不同,其与被测物体的连接方式也不同。惯性式传感器通常是直接安装在被测物体上,当测试对象的质量和刚度相对较小时,传感器会对测试对象产生附加质量和附加刚度的影响,这些影响将会改变测试对象原有的振动状态和动力特性。为了避免传感器对测试对象产生影响,一般要求被测物体的质量要远远大于传感器的质量。在测量轻薄型或超小型结构振动时,宜选用超小型传感器或非接触型传感器。

七、环境条件

振动环境是千变万化的,每一种传感器都有它适用的环境条件。环境条件包括温度、湿度、电磁场、辐射场、声场和噪声等。在选用传感器时,要充分考虑这些因素。

第三节 振动测量的基本内容

振动测试技术研究的是如何用现场测量或模拟环境试验来观察、研究机械动力系统的振动特性,分析振动产生的原因以及承受振动和冲击的能力等。其基本内容如下所述。

一、测量机器或结构在工作状态下的振动

如振动位移、速度、加速度的大小以及振动频率、周期、相位角、频谱图等,以掌握被测对象的运行状态,并对结构或机器进行状态监测、故障诊断、环境控制和等级评定等。

二、结构的动力特性试验研究

描述结构振动特性参数包括固有频率、阻尼比、振型、广义质量、广义刚度及静动平衡量等。通过现场振动测量或对机械设备及结构施加某种激励,测量其受迫振动,对实验数据进行分析 and 处理可获得被测对象的特性参数。

三、机械结构的振动和冲击强度试验

在工程实际中,有些机械结构、仪器仪表、部件等往往要在振动和冲击环境中使用,它们在出厂前必须对其在满足实际使用环境所规定的振动和冲击条件下进行振动和冲击试验,以检验产品的耐振寿命、性能稳定性、设计合理性等。这些研究在航空航天、航海、运输及电子部门等有着特别重要的意义。目前试验方法主要有:单频正弦振动试验及共振试验,正弦扫频振动试验,宽带随机和窄带随机试验,宽带随机叠加正弦扫频试验,冲击试验等。

第四节 机械振动测量传感器

传感器是电测法的核心。在振动测量中,常常需要传感器把待测的机械振动量(位移、速度、加速度、力)的变化转换为电量(电荷、电压等)或电参数(电阻、电容、电感等)的变化,因此传感器也被称为机电转换装置。目前,传感器的种类很多,应用范围非常广泛,下面简单介绍几种常用振动测量传感器的工作原理与使用。

一、惯性式传感器

惯性式传感器是利用质量弹簧系统的强迫振动特性来进行振动测量的。图1-1-4是这类传感器的结构原理图。这些传感器在使用时,其外壳与被测物体连接在一起,惯性接收是通过传感器内部由质量、弹簧和阻尼器构成的单自由度振动系统接收被测振动。由于惯性式传感器测量的是相对于惯性坐标系的绝对振动,故也称之为绝对式振动传感器。

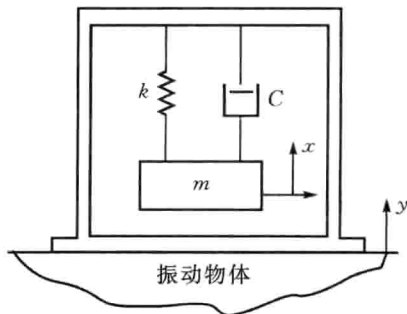


图 1-1-4 惯性式传感器结构原理图

在进行振动测试时,传感器外壳跟随振动物体一起振动,其内部质量与外壳之间产生相对运动。设振动物体的位移为 $y = y(t)$,质量块与外壳相对位移为 $x(t)$,则质量块的绝对位移为 $x(t) + y(t)$,于是质量块的运动方程为

$$m(\ddot{x} + \ddot{y}) + c\dot{x} + kx = 0$$

将上式整理得

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{y} \quad (1-1-1)$$

假设振动物体作简谐振动 $y = y_m \sin \omega t$,在此正弦运动的作用下, x 的解由两部分组成:一部分是齐次方程的解,表示传感器质量、弹簧系统的自由振动,由于系统阻尼的存在,自由振动部分将随时间衰减掉;另一部分是特解,代表强迫振动,也就是被测物体的振动所引起的传感器的响应,这一响应为

$$x = x_m \sin(\omega t - \theta)$$

将 x 和 y 代入方程(1-1-1)得

$$\frac{x_m}{y_m} = \frac{(\omega/\omega_0)^2}{\sqrt{(1 - \omega^2/\omega_0^2)^2 + (2\zeta\omega/\omega_0)^2}} \quad (1-1-2)$$

$$\theta = \arctan \frac{2\zeta(\omega/\omega_0)}{1 - (\omega/\omega_0)^2} \quad (1-1-3)$$

在式(1-1-2)和式(1-1-3)中, ω_0 为传感器的固有角频率, ζ 为相对阻尼比系数,且 $\omega_0 = 2\pi f_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$, $\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}}$, f_0 为传感器的固有频率。

式(1-1-2)和式(1-1-3)分别代表惯性式传感器的幅频特性和相频特性。若适当选取传感器的结构参数,所测结果将分别反映振动信号的位移、速度和加速度。下面由式(1-1-2)讨论惯性式传感器构成位移计和加速度计的条件。

(1)当 $\omega \gg \omega_0$,即被测频率远高于传感器固有频率时, $x_m/y_m \approx 1$,表明质量块和壳体的相对运动(输出)和基础的振动(输入)近乎相等,质量块在惯性坐标中几乎处于静止状态。因此,这时惯性式传感器可作为位移计使用,其质量块相对于外壳的位移等于被测点振动物体的位移。图1-1-5和图1-1-6分别给出了不同阻尼下的位移幅频特性曲线和相频特性曲线。

由图1-1-5可知,当 $\omega > \omega_0$ 时,惯性式位移计的幅频特性曲线逐渐进入一平坦区,并随着频率的增加而趋于1,这一平坦区域就是惯性式位移计的使用频率范围。因此,在使用位移计惯性式传感器时,测量频率要大于传感器的固有频率。为了扩展使用频率下限,这种传感器一般引进0.6~0.7的阻尼比值,这样可使幅频特性曲线在 $\omega = \omega_0$ 之后,很快进入平坦区。其使用频率上限理论上是无限制的,但实际上由于传感器安装刚度及内部元件本身局部共振的影响,频率上限也是有限的。