



普通高等教育“十二五”精品课程建设教材

# 现代测试技术

XIANDAI CESHI JISHU

第2版

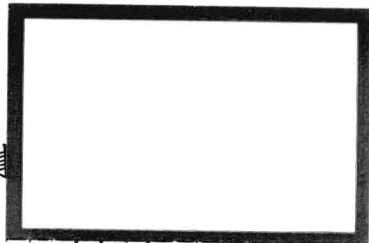
李成华 栗震霄 赵朝会 主编



中国农业大学出版社

ZHONGGUONONGYEDAXUE CHUBANSHE

普通高等教育“十二五”精品课程建



# 现代测试技术

第2版

李成华 栗震霄 赵朝会 主编

中国农业大学出版社

· 北京 ·

## 内 容 简 介

本书以现代测试技术应用为出发点,在阐述现代测试技术的基础理论与基本知识的基础上,注重基础理论与实际应用的紧密结合,重点讲授现代检测手段的原理和仪器设备的构成特点以及应用技术。主要内容包括测试系统分析、各类传感器原理、非电量基本参数的测试方法、测试信号的处理方法、测试信号的记录仪器和设备、测试中干扰的控制手段、测试结果的处理与分析等,为解决机械工程实际应用中测试技术问题奠定基础。

本书兼顾课堂教学和自学的特点与需要,各章附有一定数量的思考题与习题,以加深读者对本书内容的理解。本书可作为高等农业院校农业工程类本科专业的教学用书,也适于从事工程测试技术的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代测试技术/李成华,栗震霄,赵朝会主编.—2版.—北京:中国农业大学出版社,2012.5

ISBN 978-7-5655-0493-8

I. ①现… II. ①李…②栗…③赵… III. ①测试技术 IV. ①TB9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 029437 号

书 名 现代测试技术(第2版)

作 者 李成华 栗震霄 赵朝会 主编

策划编辑 宋俊果

责任编辑 洪重光

封面设计 郑川

责任校对 王晓凤 陈莹

出版发行 中国农业大学出版社

社 址 北京市海淀区圆明园西路2号

邮政编码 100193

电 话 发行部 010-62818525,8625

读者服务部 010-62732336

编辑部 010-62732617,2618

出版部 010-62733440

网 址 <http://www.cau.edu.cn/caup>

e-mail [cbsszs@cau.edu.cn](mailto:cbsszs@cau.edu.cn)

经 销 新华书店

印 刷 涿州市星河印刷有限公司

版 次 2012年5月第2版 2012年5月第1次印刷

规 格 787×980 16开本 18.75印张 345千字

定 价 28.00元

图书如有质量问题本社发行部负责调换

## 编审人员(第2版)

主 编	李成华	栗震霄	赵朝会		
副主编	刘立意	童淑敏	张本华	崔红光	
参编人员	黄操军	周修理	郑德聪	彭桂兰	马德贵
主 审	杨 方				

## 编审人员(第1版)

主    编	李成华	栗震霄	赵朝会
副 主 编	刘立意	童淑敏	张本华
参编人员	黄操军	周修理	郑德聪
	彭桂兰	马德贵	蔡雨付
主    审	杨  方		

## 第 2 版前言

《现代测试技术》(第 1 版)自 2001 年 11 月出版以来,在高等农业院校农业工程学科相关专业的教学中得到较广泛的应用,对于推动农业工程类本科专业教学内容和课程体系的改革起到积极的促进作用。在过去 10 年的使用过程中,读者和授课教师对教材的内容和结构提出了许多宝贵的修改意见和建议,本书编者对此表示衷心的感谢。为全面贯彻落实科学发展观,切实提高高等教育的质量,根据授课教师和本书读者的反馈意见,本书编写组决定对教材进行修订。

本次修订的指导思想是体现课程的科学性、系统性和新颖性,以适应课程教学改革和发展的需要,在组织结构上继续体现注重基础和立足应用的特点,在内容上以测试系统各组成部分的特征和性能为重点,为学生掌握现代测试技术的基本理论和具备应用测试技术进行工程实际问题的检测和分析奠定基础。

参加修订的人员有:李成华(沈阳理工大学),张本华、崔红光(沈阳农业大学),栗震霄(甘肃农业大学),赵朝会(河南农业大学),刘立意、周修理(东北农业大学),童淑敏(内蒙古农业大学),黄操军(黑龙江八一农垦大学),郑德聪(山西农业大学),彭桂兰(塔里木农垦大学),马德贵(安徽农业大学)。全书由李成华教授负责统稿,张本华教授进行了审核,杨方教授(东北农业大学)继续担任本书的主审。

本书在编写和修订过程中参考了已有工程测试技术方面的教材和资料,并在书后的参考文献中列出,本书编者对参考文献的作者表示衷心的感谢。

本书在修订过程中,得到了沈阳农业大学和中国农业大学出版社的热情支持和帮助,谨此一并表示衷心的感谢。

编 者

2011 年 11 月

## 第 1 版前言

《现代测试技术》是根据面向 21 世纪农业工程类本科专业教学内容和课程体系改革的精神和 2000 年 11 月 3 日召开的全国部分农业院校农业工程类本科专业教材建设研讨会上提出的关于《现代测试技术》教材的编写大纲要求,由沈阳农业大学、甘肃农业大学、河南农业大学、东北农业大学、内蒙古农业大学、黑龙江八一农垦大学、山西农业大学、塔里木农垦大学、安徽农业大学共同组织编写的。

现代测试技术是农业工程类本科专业的一门应用技术基础课程,它所涉及的内容和知识非常广泛。为适应科学技术的发展,本书强调基础理论与基本知识的讲授,注重基础理论与实际应用的结合,重点介绍现代检测手段的原理和仪器设备的构成特点以及应用技术,为解决工程实际应用中测试技术问题奠定基础。在教材内容的安排上,首先注重测试技术的基础性,突出强调技术基础在人才培养过程中的重要性,同时以测试技术的基本原理以及仪器设备的构成原理为主导,培养学生具备工程技术领域测试技术应用的基本能力;其次是强调实践性和测试技术领域各种技术相互的渗透和综合,即在切实加强基础理论和基本技能训练的同时,特别强调培养学生综合运用测试技术基础知识和技能来分析和解决工程实际问题的能力。为此,必须加强实践性的教学环节以及重视自学能力的培养,使学生具备应用测试技术原理和仪器设备组成实际测试系统的能力。

本教材的编写人员有:李成华、张本华、蔡雨付(沈阳农业大学),栗震霄(甘肃农业大学),赵朝会(河南农业大学),刘立意、周修理(东北农业大学),童淑敏(内蒙古农业大学),黄操军(黑龙江八一农垦大学),郑德聪(山西农业大学),彭桂兰(塔里木农垦大学),马德贵(安徽农业大学)。全书由李成华教授负责统稿,杨方教授(东北农业大学)担任主审。

本书在编写过程中参考了已有测试技术方面的教材和资料,并在书后的参考文献中列出。这些宝贵的资料对完成本书的编写起到了非常重要的作用,本书作者对所有参考资料的作者表示衷心的感谢。

本书可供高等农业院校农业工程类本科专业的教学之用,也可作为从事机械工程领域测试技术工作的工程技术人员的参考资料。

编 者

2001 年 7 月

# 目 录

<b>1 绪论</b> .....	( 1 )
1.1 测试技术的地位和作用 .....	( 1 )
1.1.1 测试技术的地位 .....	( 2 )
1.1.2 测试技术的作用 .....	( 8 )
1.2 测试系统的组成及特点 .....	( 8 )
1.3 现代测试技术的发展趋势 .....	( 10 )
1.4 课程的研究内容和性质 .....	( 13 )
<b>2 测试系统分析</b> .....	( 15 )
2.1 信号概述 .....	( 15 )
2.1.1 信息与信号 .....	( 15 )
2.1.2 信号的分类与描述 .....	( 16 )
2.2 测试系统的组成及基本特性 .....	( 23 )
2.2.1 测试系统的组成特点 .....	( 23 )
2.2.2 测试系统的数学模型 .....	( 24 )
2.2.3 测试系统的静态特性 .....	( 25 )
2.2.4 测试系统的动态特性 .....	( 27 )
2.2.5 测试系统的不失真条件 .....	( 39 )
复习与思考题 .....	( 41 )
<b>3 传感器原理</b> .....	( 42 )
3.1 传感器的基本概念 .....	( 42 )
3.1.1 传感器的定义与组成 .....	( 42 )
3.1.2 传感器的分类与要求 .....	( 42 )
3.1.3 传感器的基本特性 .....	( 43 )
3.2 常用传感器 .....	( 45 )
3.2.1 电阻式传感器 .....	( 45 )



---

3.2.2	电感式传感器	(51)
3.2.3	电容式传感器	(54)
3.2.4	压电式传感器	(56)
3.2.5	热电式传感器	(58)
3.2.6	光电传感器	(62)
3.2.7	核辐射传感器	(64)
3.2.8	磁电式传感器	(67)
3.3	新型传感器	(68)
3.3.1	光纤传感器	(68)
3.3.2	智能式传感器	(70)
3.3.3	生物传感器	(71)
3.3.4	固态图像传感器	(73)
3.3.5	湿度传感器	(76)
3.3.6	红外传感器	(79)
3.3.7	霍尔传感器	(82)
3.3.8	超声波传感器	(87)
3.3.9	工业 CT 检测技术	(91)
3.4	传感器应用中的技术问题	(93)
3.4.1	传感器非线性特性的线性化	(93)
3.4.2	传感器的选用原则	(97)
	复习与思考题	(98)
4	非电量基本参数的测试方法	(99)
4.1	力和转矩的测量	(99)
4.1.1	常用的布片和接桥方式	(99)
4.1.2	应变测量中的一些技术问题	(103)
4.1.3	转矩的测量	(104)
4.2	位移和厚度测量	(105)
4.2.1	位移的测量	(105)
4.2.2	厚度的测量	(114)
4.3	速度和加速度的测量	(118)

---

4.3.1	运动速度的测量	(118)
4.3.2	加速度的测量	(120)
4.4	振动的测量	(124)
4.4.1	测振用传感器	(124)
4.4.2	测振用放大器	(125)
4.4.3	振动测量	(126)
4.5	转速的测量	(129)
4.5.1	机械式转速计	(129)
4.5.2	电磁式转速仪	(131)
4.5.3	光电式转速仪	(131)
4.5.4	测速发电机转速仪	(132)
4.5.5	霍尔效应式转速测量	(132)
4.5.6	闪光频率式测速仪	(133)
4.6	噪声的测量	(135)
4.6.1	噪声度量与评价的基本参数	(135)
4.6.2	噪声测试仪器——声级计	(139)
4.6.3	噪声测试的基本方法	(141)
4.7	压力的测量	(144)
4.7.1	压力测量概述	(144)
4.7.2	压力测量仪表	(144)
4.8	温度的测量	(149)
4.8.1	热电阻测温系统	(151)
4.8.2	热电偶测温系统	(153)
4.8.3	非接触式测温系统	(155)
4.9	湿度的测量	(157)
4.9.1	湿度及其测量原理	(157)
4.9.2	相对湿度的测量	(159)
4.9.3	绝对湿度的测量	(160)
4.10	流量的测量	(161)
4.10.1	概述	(161)

4.10.2	差压式流量计	(161)
4.10.3	转子流量计	(165)
4.10.4	电磁流量计	(165)
4.10.5	超声波流量计	(167)
	复习与思考题	(167)
<b>5</b>	<b>测试信号的处理</b>	(168)
5.1	传感器变换电路	(168)
5.1.1	电桥电路	(168)
5.1.2	信号放大电路	(173)
5.2	调制与解调	(179)
5.2.1	调制与解调概述	(179)
5.2.2	幅值调制与解调	(180)
5.2.3	频率调制与解调	(184)
5.3	滤波原理	(187)
5.3.1	滤波器分类	(188)
5.3.2	理想滤波器	(189)
5.3.3	实际滤波器	(190)
5.3.4	滤波器的组合应用	(198)
5.3.5	数字滤波器	(201)
5.4	模拟和数字转换	(202)
5.4.1	模拟和数字转换概述	(202)
5.4.2	数字—模拟(D/A)转换器	(203)
5.4.3	模拟—数字(A/D)转换器	(206)
	复习与思考题	(208)
<b>6</b>	<b>测试信号的记录</b>	(209)
6.1	常用记录仪器	(209)
6.1.1	记录仪器概述	(209)
6.1.2	描笔式记录仪	(210)
6.1.3	光线示波器	(212)
6.1.4	磁带记录仪	(218)

---

6.2	新型记录仪 .....	(224)
6.2.1	无机械惯性记录系统 .....	(224)
6.2.2	阵列式记录仪器 .....	(225)
6.2.3	波形存储式记录仪 .....	(228)
6.3	计算机在数据记录中的应用 .....	(230)
6.3.1	信号输入和数据输出通道基本结构 .....	(230)
6.3.2	采样与保持电路特性参数 .....	(232)
6.3.3	计算机接口技术 .....	(233)
6.3.4	输入输出控制方式 .....	(237)
6.3.5	虚拟仪器测量技术 .....	(239)
	复习与思考题 .....	(245)
<b>7</b>	<b>测试中干扰的控制 .....</b>	<b>(247)</b>
7.1	干扰的类型及产生 .....	(247)
7.2	干扰信号的基本输入方式 .....	(248)
7.2.1	电容耦合 .....	(248)
7.2.2	电感性耦合 .....	(249)
7.2.3	公共阻抗耦合 .....	(249)
7.2.4	串模干扰 .....	(250)
7.2.5	共模干扰 .....	(250)
7.3	常用抗干扰技术 .....	(251)
7.3.1	正确接地 .....	(251)
7.3.2	采用电源滤波器、浪涌吸收器、交流稳压器 和直流稳压电源 .....	(252)
7.3.3	隔离和屏蔽 .....	(252)
7.3.4	加去耦电容 .....	(253)
7.3.5	正确配线与布线 .....	(253)
7.3.6	软件滤波 .....	(253)
	复习与思考题 .....	(254)
<b>8</b>	<b>测试结果的处理与分析 .....</b>	<b>(255)</b>
8.1	测量误差理论与分析 .....	(255)

---

8.1.1	误差的来源与分类 .....	(255)
8.1.2	误差对测试结果的影响 .....	(256)
8.1.3	随机误差和系统误差 .....	(257)
8.1.4	误差的综合与分配 .....	(264)
8.2	确定性信号的处理与分析 .....	(267)
8.2.1	静态测量结果的数据处理 .....	(267)
8.2.2	数字信号处理与分析 .....	(272)
8.3	随机信号的处理与分析 .....	(276)
8.3.1	均值、均方值和方差(时域分析).....	(276)
8.3.2	概率密度函数(幅值域分析) .....	(277)
8.3.3	相关分析(时延域分析) .....	(278)
8.3.4	频谱分析(频域分析) .....	(281)
8.3.5	相干函数(凝聚函数) .....	(283)
8.3.6	随机数据处理的一般过程 .....	(284)
	复习与思考题.....	(285)
	参考文献.....	(286)

# 1 绪 论

## 1.1 测试技术的地位和作用

人类社会在发展过程中,需要不断地认识自然与改造自然,这种认识与改造必然伴随着对各种信号的感知和测量。科技越发达,自动化程度越高,对传感器的依赖也就越强。现在,测量科学已成为现代化生产的重要支柱,也是整个科学技术和国民经济的重要技术基础,它对促进生产力发展与社会进步起重要作用。在科学研究中,任何科学理论的建立和科学研究成果的提出都必须通过大量的试验与测量,并对通过测量所获得的数据进行分析和计算,以验证科学理论以及研究成果的正确性和可靠性。在工农业生产过程中,为了保证生产的正常进行,必须对生产过程中的各种参数进行测量,并在分析测量结果的基础上,对生产过程进行监视和控制,以保证产品的质量。在这些测量过程中所应用的测量手段就是测量仪器或仪表,而应用测量仪器或仪表来实现测量目的的技术工艺则称为测试技术。现代化的测试仪器是科学研究和生产实践的必要手段,它的水平高低是科学技术发展的重要标志,同时也是科学研究和生产技术发展的一个重要技术基础。

测试技术的发展是随着科学技术和生产实践的发展而前进的,因为随着科学技术和生产实践的向前发展,就要求提供新的测试手段以满足需要,这样又促进了测试仪器以及测试技术的发展,而科学技术的发展又为研制新型的测试仪器提供了条件。近 30 年来,随着电子技术和计算机应用技术的飞速发展,传统的测试技术得到了较大的改进和提高,如测试准确度和灵敏度得到了提高,测试速度变得更快,测试结果能连续实时自动记录,并可用计算机对测试结果进行分析计算以及实时完成生产过程的自动控制等。

在科学研究和工程技术上所要测量的参数大多为非电量,如机械量的位移、速度和加速度,热工量的温度、压力和流量,成分量的化学成分和浓度以及状态量的颜色、磨损量和裂纹等。这些参数的物理特性或化学特性千差万别,在测量过程中,测量结果的传输和保存以及显示非常不方便,因而促使人们研究用电量测试的手段来进行这些非电量的测试。这是由于电测技术具有测量精度高、反

应速度快、数据传输方便并且能够连续自动记录等优点。这样就形成了非电量的电测技术。非电量测试技术具有两个方面的内容：一方面是研究用电测手段测量非电量的仪器和仪表；另一方面是研究如何能正确和快速地进行非电量的测试。

### 1.1.1 测试技术的地位

#### 1. 测试是现代生产的推动器

生产力是社会发展的决定因素，一个国家的国力首先取决于它的生产能力，特别是它的制造能力，而测试技术是决定制造水平的因素之一。自古以来，衡量生产水平的两大指标一直是质量和效率。测试对于保证质量的重要性是不言而喻的，没有测试就无法评定产品质量的优劣，更无从保证产品的质量。何况现代生产都是通过测试，实现反馈，控制产品的质量。

生产效率同样也离不开测试。一台高速切削机床必须有良好的轴系，包括回转精度、动平衡等，而这一切都需要测试。生产效率是以每一个人在单位时间内的产值来衡量的，为了提高生产效率必须实现自动化。制造业的自动化起源于20世纪初，主要是利用凸轮、挡块等在纺织、钟表等大规模生产中实现刚性自动化。科学技术的进步要求产品不断更新、工艺技术不断进步，这种刚性自动化在多数情况下已经成为生产发展的障碍，现代的自动化是柔性自动化，越是柔性的系统越需要测量。没有测量就无法获得反馈信息，正确、准确地控制工艺过程和执行部件的运动。

生产过程包括物质流、能源流与信息流，其中信息流是最活跃的，物质流与能源流在信息流的指挥下运动。信息技术与制造技术的融合是机械制造技术发展的主要方向，这些年制造业的最大进步是实现制造业的信息化，而作为提供源头信息的测试技术在这里起关键作用。越是现代化的企业，测控设备在总投资中的比例越大。例如，宝山钢铁公司建设中仪器仪表测试装备占总投资1/3。仪器仪表、测试装备对整个国民经济的推动作用很大。国家中长期科学技术发展规划指出，仪器仪表是国民经济的倍增器。美国20世纪90年代仪器仪表只占工业总产值4%，但它对国民经济的影响面占66%。

作为自动化的进一步发展就是智能化。智能化生产要求生产过程能自动适应环境、原材料、工具和装备条件的变化，使生产系统工作在最佳状态，获得最优的产品与效益。智能化生产要求在整个生产过程中，对环境、原材料、工具和装备的状态进行检测，并在此基础上做出决策，使生产过程按最佳方式进行，精确

测试是智能控制的关键。

## 2. 没有测试,就没有科学

国力竞争的关键是科技水平,我国与发达国家的差距也主要是科技上的差距。我国已将科技兴国作为基本方针,而测试技术是科学发展必不可少的手段。伟大的化学家、计量学家门捷列夫说过:“科学是从测量开始的,没有测量就没有科学,至少是没有精确的科学、真正的科学。”我国“两弹一星”元勋王大珩院士也说过:“仪器是认识世界的工具;科学是用斗量禾的学问。用斗去量禾就对事物有了深入的了解、精确的了解,就形成科学。”

科学上的发现和技术上的发明是从对事物的观察开始的。对事物的精细观察就要借助于仪器,就要测试,特别是在自然科学和工业生产领域更是如此。在对事物的观察、测试基础上经过分析推导,形成认识。到这一阶段还只能是假说、学说。实践是检验真理的唯一标准,只有再经过测试和考核,才能真正形成科学,所以说在科学发展的哪一阶段都离不开测试。国家中长期科学技术发展规划指出,仪器仪表和测试是“新技术革命”的先导和基础。

纵观科学发展史和科技发明史,许多重大发现和发明都是从仪器仪表和测试技术进步开始的。从20世纪初到现在,诺贝尔奖颁发给仪器发明、发展与相关实验项目的达27项之多。众所周知,没有哈勃望远镜就难以进行天体科学的研究,天体科学上的许多重大发现都是依靠哈勃望远镜的观测而得到的。扫描隧道显微镜的发明对纳米科技的兴起和发展可以说起到了决定性作用。

苹果落在牛顿的脑袋上,启发了牛顿的灵感。但真正导致万有引力被发现的还是星球的运动。按照牛顿第一定律,在没有外力作用的情况下,月亮应该做等速直线运动,为什么月亮不飞出去,而是绕地球转动?这是困惑牛顿的一个问题。只有在有向心力作用的情况下,月亮才会绕地球转动。苹果落在牛顿的头上,启发牛顿意识到一定是地球对月亮有一个引力。牛顿根据他假设的万有引力公式和向心力的公式进行了计算,由于当时测量技术的限制,牛顿没有获得正确的答案。牛顿是一个科学家,没有得到实践证明的东西,还不是科学,他没有发表。只有在他故去之后,由于测试技术的进步,在测得了地球与月亮的较精确的距离和地球的质量的情况下,万有引力学说才得到了证实,是他的学生发表了牛顿的论文,使牛顿万有引力成为科学。测试在将“学说”发展为科学中往往起着关键作用。

## 3. 测试在信息科技中至关重要

当今时代是信息时代。信息科技包括信息的获取、处理、传输、存储、执行。测试是科技、生产领域获取信息的主要手段,在这个信息流中处于源头位置,所



以从一定意义上说,没有测试,信息科技就成了无源之水、无本之木。处于源头的信息是最微弱、最容易受到干扰的。信息的准确性首先取决于源头信息,取决于测试。为了提高所获取信息的准确性,现代测试系统往往还包括信息的预处理、预存储、传输和控制,把从信息的获取到控制作为一个整体来对待。

谈到信息科技,人们往往首先想到的是计算机。信息时代的主要标志是高性能的电子计算机的发展与广泛应用。确实,高性能计算机的发展将信息处理和存储技术发展到目前高度,使信息流在推动科技和生产的作用发生了革命性的变化。需要指出的是,计算机的发展也离不开制造技术和测试技术。

计算机的性能指标首先是它的运算速度和存储容量,这些都取决于在一块芯片上能集成多少个晶体管,后者又取决于大规模集成电路的线条能做得多细。目前,大规模集成电路的线宽已做到 $0.1\ \mu\text{m}$ 左右,进一步的发展要求将线条做到纳米级。知名的摩尔定理说芯片上开关器件的密度每18个月翻一番,其实这是在N. Taniguchi于1974年提出的制造误差按指数曲线下降的预测基础上得出的。正是精密工程按N. Taniguchi预测的曲线发展,保证了计算机工业的发展,保证了摩尔定理的兑现。

#### 4. 国防和高科技的发展离不开测试

现代战争是信息战。无论是在科索沃,还是伊拉克,美国使用的主要武器都是激光制导武器。在现代战争中,仪器仪表的测量控制精度决定了武器系统的打击精度。仪器仪表的测试速度、诊断能力决定了武器系统的反应能力。无论在伊拉克,还是在巴勒斯坦,美国和以色列常常采用定点杀伤。所谓定点杀伤,就是根据探测到的信号进行跟踪、瞄准和发射。

美国还在发展一种称为反导弹的战略计划,它的基本思想就是精确、快速探测对方发射的导弹,并在此基础上发射自己的火箭进行拦截。测试是这一战略思想的技术基础。

一部现代的汽车有五六十个传感器,飞机、火箭、宇宙飞船上何止几百、几千个传感器。一架飞机、火箭、宇宙飞船从它的加工到装配一步也离不开检测,飞机、火箭、宇宙飞船的加工和装配精度是生死攸关的。火箭在现场安装、准备发射都离不开检测。俗话说,差之毫厘,失之千里,这是一种形容;而今火箭、宇宙飞船的发射差之毫厘,又何止失之千里?

在发射场上精确找正并发射后,由于大气和其他天体、气象等因素的影响,火箭、飞船还可能偏离预定的轨道。需要不断地检测航行的轨迹,进行校正。不仅要按测量结果校正航行轨迹,还要按测得的加速度控制燃料和气体的排放,以保证飞行轨道的准确,而对所有这些检测的精度和速度响应的要求是极高的。