## 1课题背景与研究目的

电液伺服控制系统，具有控制功率大、控制精度高、响应快速等一系列优点，被广泛的应用在航天、航空、航海、飞航导弹和运载火箭等方面的航行控制上。在电液伺服控制系统中，弹簧管作为力反馈元件，其刚度特性将直接影响到伺服阀的性能。

除了电液伺服阀中的弹簧管之外，在航天、航海、航空制造领域以及其他一些控制器件中广泛的应用了类似的精密弹性元件作为力敏感元件以获得反馈信号。例如在惯性陀螺仪表中的扭杆、挠性陀螺中的挠性接头、尾翼式火箭弹上的扭转弹簧、电液伺服阀中的弹簧管、反馈等。这些精密弹性元件的刚度参数对相对应的控制器件、导航器件及火箭弹的整体性能影响很大。因此，在加工过程中不仅对精密弹性元件的尺寸精度和几何形状精度提出很高的要求，而且对其刚度特性也提出一定的要求。这些精密弹性元件的刚度测量也属于加工工艺的一部分，因此以弹簧管作为研究对象对刚度精密测量技术展开基础性研究对其它弹性元件的刚度测量也有普遍的指导意义。

### 1.1电液伺服阀的工作原理

电子电气元件作为反馈测量元件以及放大变换元件是比较理想的。液压执行装置的输出功率大，结构紧凑，作为动力元件十分合适。因而电液组合系统可以获得较高的静态和动态品质。这种组合中间的转换作用目前普遍地采用电液伺服阀来完成。电液伺服阀将小功率的电信号转变为阀的运动，阀的运动又去控制流向液压执行装置的流量和压力。

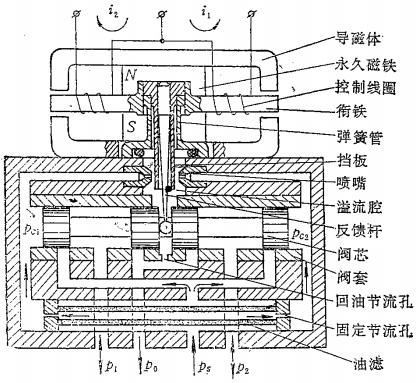
图A所示为一种目前广泛应用的喷嗦挡板-滑阀型力反馈电液伺服阀的结构示意图。其组

Figure 1喷嘴挡板-滑阀型力反馈电液伺服阀

成总的可以分为三大部分：动铁式永磁力矩马达、喷嘴挡板前置放大器、滑阀放大器。三者通过反馈杆建立协调关系。

分析其动作原理，当给力矩马达一个差动控制电流时，衔铁转动角，使挡板偏离两个喷嘴之间的中立位置一个位移，在两个喷嘴前腔中便形成压力差。在阀芯还相当于处于静止状态时，反馈杆端点的变形量为（如图b所示）。当滑阀的阀芯在压力差的作用下带动反馈杆短点向右移动时，反馈杆继续变形，其短点变形量为。此时，反馈杆变形产生的力矩加上弹簧管变形产生的力矩，与力矩马达在电流作用下产生的力矩达到平衡。反馈杆的变形使挡板被部分地拉回中位，同时反馈杆端点对阀芯的反作用力平衡阀芯两端的压力差。使阀芯停止运动而保持位移。这样就使电流对应一个阀芯位移。有了滑阀就能输出一个对应的流量。因此，达到了用差动控制电流控制流量的目的。如果=0，阀芯在反馈杆变形产生的反作用力下会回到零位，这时反馈杆也处于零位状态。

在电液伺服阀中，力矩马达的作用是将电信号转换为机械运动，是一种电气机械转化器。力矩马达主要由控制线圈、永久磁铁、导磁体和衔铁组件组成，衔铁反馈杆组件结构如下图2所示，主要包括衔铁、弹簧管及反馈杆。伺服阀工作时该组件主要起到两方面的作用。一方面用来平衡力矩马达输出的电磁力矩，即当衔铁转动的时候，组件中的板簧、扭丝、油管、弹簧管及反馈杆均产生反作用力矩；另一方面，在阀芯运动时反馈杆还用来平衡左右两腔油液压力差对阀芯施加的力。当衔铁受到力矩马达输出力矩的作用时，衔铁偏转，结构发生变形。喷嘴挡板阀与射流管伺服阀的反馈杆变形对比如下图 2 所示。

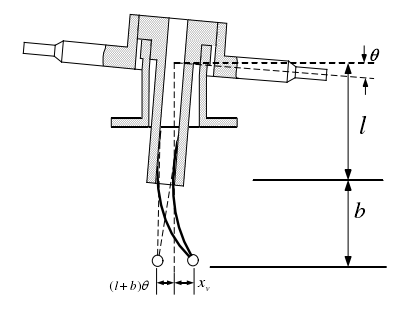


Figure 2衔铁挡板组件变形图

由电液伺服阀的工作原理可以知道，作为衔铁组件中敏感的力反馈器件，弹簧管的刚度特性对于伺服阀的整体性能有着至关重要的影响。

### 1.2弹簧管介绍

弹簧管是一种中空薄壁型弹性零件，如图3所示，弹簧管的内径和头部外径分别与挡板大端外径和衔铁中孔成过盈配合，各配合部位的尺寸精度、几何精度和表面粗糙度要求都很严，内、外圆的圆度和圆柱度要求均在 0.001mm 之内。弹簧管薄壁处的厚度约为 0.06mm，要求薄壁管厚度均匀，内外表面不能有任何轻微的划伤和刀痕，弹簧管的薄壁是决定弹簧管刚度值的重要部位，是弹簧管的最关键部位。

从航空领域某伺服阀生产厂家处了解到，目前国内弹簧管的生产加工过程如下：首先对加工弹簧管的用料进行热处理并进行晶粒度和金相组织检查；然后进行粗加工，车出弹簧管的外形并钻出中孔，留出需要继续进行半精加工和精加工部位的加工余量；在半精加工中用专用硬质合金绞刀分粗、精两次绞削内孔并留出研磨余量，精车弹簧管头部外圆达到图纸尺寸要求，精车弹簧管的薄壁段的外圆并留出磨削余量；最后进行精加工，首先采用珩磨或研磨的方法对中孔进行光整加工，之后先粗后精磨削薄壁处的外圆，经过精磨之后的薄壁外径还需要留有一定的余量，这时需要测量弹簧管的刚度是否满足设计规定的弹簧管的刚度，如果不满足（大于设计规定值）就需要对此外径进行少量磨削后再进行刚度测量，重复以上步骤直至测量的刚度值满足设计为止。

所以，在弹簧管的加工工艺过程中，对弹簧管刚度进行测量是整个弹簧管精加工工艺的一部分，测量的目的是指导对弹簧管的薄壁进一步精加工，而不仅是传统意义上给出是否合格的信息。测量效率以及测量精度将成为评价一个测量系统能否指导弹簧管生产的重要指标。

随着航空航天技术的不断发展，对精密弹性元件的刚度测量要求越来越高。航空工业某精密弹性元件生产厂家希望改进其弹簧管和反馈杆的测量方法，将原有的手工悬挂砝码式测量方法改进为精度高、效率高的自动化测量方法。本课题目的就是为了研究精密弹性元件的刚度测量方法，并研制出一台自动加载，多点测量，并能够输出刚度测量结果的测量设备。



Figure 4弹簧管实物图

## 2.研究方法与预期结果

弹簧管刚度测量系统能实现弹簧管静刚度的测量，采用主动式加载，承载对象固定，不存在位置扰动。测控系统应能实现实时控制、数据存储、回放、浏览、打印等功能；应具备调试、自动实验功能，以及各种信号的检测和显示。

根据上述要求，系统采用上下位机式分布式控制系统，将控制功能和管理功能分开，利用计算机技术对实验过程进行集中监视、操作、管理和分散控制,系统软件由集中管理部分、分散控制监测部分和通讯部分组成。其中下位机基于FPGA实现系统控制与信号的实时采集。同时考虑到Windows在人机交互界面方面的优越性，上位机软件在Windows环境下采用Qt编写，这样以达到控制实时性和管理人性化的最佳组合。

## 3.技术难点和关键概述

根据用户提出的测量的特点、精度要求和“技术要求”中提出的其它诸要求，该项任务的主要技术难点与技术关键可归纳成以下各点：

1.系统集成化设计

根据协议，该系统能实现多点测量、自动加载，并能够输出刚度测量报告，因此需要设计出一个高度集成化、自动化的系统，需要机械、硬件、软件之间良好的配合。在功能集成方面，需要考虑系统功能模块化、操作管理人性化、信息显示直观化的设计方案。

2.系统的误差分析

弹簧管作为精密弹性元件，其刚度测量对精度要求极高。因此，需要从测量原理、加载过程、信号采集等多方面分析可能的误差。尤其在加载过程中，加载机构、安装夹具、传感器的微小变形都需要通过建模仿真来分析其误差。

3.上下位机的软硬件设计

测量系统采用上下位机式分布式控制系统，其中，上下位机之间的通信，下位机基于FPGA的高速采集和实时控制将是系统设计方面的难点。

## 4刚度测量技术的国内外研究现状

### 4.1国内研究现状综述

弹簧管以及精密弹性元件的研究，国内外均有了一定研究成果。

国内大部分生产伺服阀的厂家仍旧采用传统的手工吊砝码法来测量精密弹簧管的刚度，该方法优点在于：砝码加载简单，对测量设备要求较低，测量的方法容易被工人掌握。但是传统手工测量方法在测量效率和精确度上存在着明显的缺陷：人工读数、记录数据、计算刚度，过程繁琐，劳动强度大，导致无法实现高效率的连续测量；同时由于测量视觉误差等人为误差的存在，使得其测量的不重复误差高达3%以上。

除此之外，国内各高校研究机构都提出了一些具有代表性的测量方法：国防科技大学的电容测头测位移法实现了测量的自动化，由于载荷施加方式存在较大的原理性误差，并且该种方法一直没有得到实际应用；上海交通大的光学微位移检测法该方法实现了自动化测量，采用光学器件CCD来实现变形量的测量，增强了系统的抗干扰能力，由于CCD分辨率的限制和光学系统的结构复杂性等原因，致使该方法并没有得到推广应用；浙江大学徐兵基于弹簧管的刚度分析进一步研究了伺服系统的影响，针对各种挠性零件刚度测量等都做过相关方面的研究，但大部分测量方法没有应用于实际研究；哈尔滨工业大学的王广林等采用了单臂力两点测量方法与接触理论，对弹簧管刚度模型分析及相关测量方式转换的研究；李松晶等研究了多场耦合下的含有弹簧管的衔铁组件振动特性；哈工大工艺自动化及检测研究室研究了精密弹性元件刚度自动测量技术的研究，该测量方法已经应用于实际。

### 4.2国外研究现状

近些年，国外在刚度测量方面也做出过大量研究，尤其是在精密弹性元件领域。

V Karayel等人提出了一种基于新型低成本隔震系统的弹簧管支撑。测定了弹簧管在不同频率轴向位移反向作用下的性能；田中郁岱等人发展出一种强直用于测量软化立方非线性和负线性刚度的传感器；Yanushkin等人开发了一种基于精密极值测量系统[17]的线性和角位移测量仪器；Kolyada等人在设计中使用了栅格网格高精度数字光电传感器，用于模块和组件挠度测量头在二坐标和三坐标测量仪器中分别测量了线位移和角位移；Joachim等人开发了一种自行车车架刚度的多用途等级测试方法。提出的试验台设计考虑了测量自行车车架刚度时应考虑的不同方面。

结合国外航空航天等军工行业的发展水平和所取得的成果，可以看出，其在精密弹性元件的刚度测量领域，有着较为深厚的技术积累。

## 5本课题研究的主要内容

本文的主要内容包括研究弹簧管的测量方法，并研制出一套可以指导弹簧管实际生产的刚度测量系统。

本文首先以精密弹簧管为研究对象，结合实际环境分析其受力，对其测量原理加以分析介绍测量的具体方案。其次根据测量方案，从机械、电气、传感器、软件等多个角度考虑，设计出弹簧管的刚度测试系统。

再次，对测试方案本身以及设计出的刚度测试系统进行误差分析，包括加载方式、传感器安装、固定夹具、数据采集等多个误差源的分析。

最后利用试验平台与有限元仿真，分析弹簧管本身特性，验证该测量弹簧管刚度模型的有效性以及测量系统的性能。为精密元件与整个阀系统优化设计提供理论基础。