

# 气压伺服系统

QIYA SIFU XITONG



曲以义 编

上海交通大学出版社

# 气 压 伺 服 系 统

曲 以 义 编

上海交通大学出版社

## 内 容 提 要

本书较系统地介绍了气压伺服系统及元件的基础理论。全书分五章,主要内容有:控制元件和执行元件的气动计算和动态特性分析;气压伺服阀的构造原理、静态特性分析、补偿方法及其理论分析;气压伺服系统的性能与设计计算。

本书可作为大专院校流体控制及传动专业教材,也可供有关工厂与研究所工程技术人员参考。

### 气压伺服系统

上海交通大学出版社出版

(淮海中路1984弄19号)

新华书店上海发行所发行

常熟文化印刷厂印装

---

开本 850×1168毫米 1/32 印张 7.75 字数 199000

1986年12月第1版 1987年1月第1次印刷

印数: 1—3,000

统一书号: 15324.174 科技书目: 137—271

---

定价: 1.60元

# 前 言

流体动力控制系统已在各工程技术部门得到了广泛应用。作为流体动力控制的重要分支—气压伺服控制系统,由于其体积小、抗污染、受温度场变化影响小以及能源容易获得等优点,与液压伺服控制系统一样,愈来愈被人们所重视。为适应技术发展和培养人才的需要,编者根据1981~1985年全国造船类专业教材编审会议确定的教学计划和大纲,结合讲授“气压伺服机构”课的教学实践,吸收并综合了国内外文献资料的精华写成本书。

全书共五章:第一章介绍气压伺服系统的基本概念、特点及应用场合;第二章和第三章讲述气压伺服控制系统中的控制元件和执行元件的工作原理,即元件的气动计算和动态特性分析;第四章着重介绍气压伺服阀的构造、原理与计算、带有补偿特性的气压伺服阀的理论分析、阀的动态特性以及改善性能的方法;第五章介绍阀控型气压伺服系统动态方程组、分析系统参数对性能的影响、讨论具有动压力反馈作用的气压伺服系统的理论计算。

全书由哈尔滨工业大学流体传动及控制研究室李天贵同志审稿,他对初稿提出了很好的意见。此外,在编写过程中,还得到上海交通大学流体控制及传动研究室有关同志的帮助,对此一并致谢。

由于编者水平所限,如有不妥之处,诚恳欢迎使用本书的师生及广大读者批评指正。

编 者  
1985年7月

## 符 号 说 明

- $A$ ——节流通道的控制截面面积,  $\text{m}^2, \text{mm}^2$ ;  
 $A_0$ ——固定节流孔有效截面面积,  $\text{m}^2, \text{mm}^2$ ;  
 $A_s$ ——阀芯有效作用面积,  $\text{m}^2$ ;  
 $A_f$ ——活塞有效作用面积,  $\text{m}^2, \text{mm}^2$ ;  
 $c_D, c_V$ ——气体定压比热和定容比热,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$   
 $F$ ——摩擦推力或拉力,  $\text{N}$ ;  
 $f$ ——摩擦力,  $\text{N}$ ;  
 $G$ ——气体重量流量,  $\text{N}/\text{s}$ ;  
 $J$ ——惯性矩,  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ;  
 $k, n$ ——气体绝热指数、多变指数;  
 $m$ ——气体质量,  $\text{kg}$ ;  
 $m_1$ ——负载、运动部件总质量,  $\text{kg}$ ;  
 $\dot{m}$ ——气体质量流量,  $\text{kg}/\text{s}$ ;  
 $p_s$ ——供气压力(气源压力),  $\text{bar}, \text{Pa}$ ;  
 $p_a$ ——进入负载工作压力或大气压力,  $\text{bar}, \text{Pa}$ ;  
 $p_u$ ——节流控制面上游气体压力,  $\text{bar}, \text{Pa}$ ;  
 $p_d$ ——节流控制面下游气体压力,  $\text{bar}, \text{Pa}$ ;  
 $p_e$ ——排气压力、环境压力,  $\text{bar}, \text{Pa}$ ;  
 $Q$ ——气体容积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  
 $T_n$ ——节流控制截面通道上游气体温度,  $\text{K}$ ;  
 $T_d$ ——节流控制截面通道下游气体温度,  $\text{K}$ ;  
 $T_s$ ——供气气体温度(气源温度),  $\text{K}$ ;  
 $u, w$ ——气流流速、气流微团速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  
 $u_\theta, u_r$ ——气流微团分速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;

$W$ ——气体重量, N;  
 $\Delta W$ ——气流微团重量, N;  
 $x$ ——喷嘴挡板间隙, m, mm;  
 $y, Y$ ——活塞位移或滑阀位移, m, mm;  
 $\dot{y}, \dot{Y}$ ——活塞速度, m/s;  
 $\rho$ ——气体密度, kg/m<sup>3</sup>;  
 $\gamma$ ——气体重度, N/m<sup>3</sup>;  
 $\mu$ ——气体动力粘度, N·s/m。

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	(1)
§1-1 概述 .....	(1)
§1-2 气压伺服控制系统的概况 .....	(1)
§1-3 气压伺服系统与液压伺服系统的比较 .....	(11)
<b>第二章 气压伺服系统中的控制元件</b> .....	(13)
§2-1 概述 .....	(13)
§2-2 气动控制阀的特性 .....	(13)
§2-3 圆柱滑阀的特性分析 .....	(16)
§2-4 喷嘴-挡板阀的特性分析 .....	(50)
§2-5 气压伺服系统中喷嘴挡板机构的动态特性 .....	(80)
§2-6 气压伺服系统中的射流管阀 .....	(93)
<b>第三章 气压控制中的执行机构(元件)</b> .....	(100)
§3-1 概述 .....	(100)
§3-2 气缸(气压作动筒) .....	(101)
§3-3 气压马达 .....	(125)
<b>第四章 气压伺服阀</b> .....	(129)
§4-1 概述 .....	(129)
§4-2 带有弱弹簧补偿的力反馈气压伺服阀理论分析 .....	(131)
§4-3 不带弹簧补偿的力反馈气压伺服阀理论分析 .....	(152)
§4-4 采用弹簧、容器双补偿的力反馈气压伺服阀理论分析 .....	(154)
§4-5 具有补偿特性的力反馈气压伺服阀静特性 .....	(168)
§4-6 有补偿特性的力反馈气压伺服阀的稳定区域 .....	(170)
§4-7 气压伺服阀的响应特性 .....	(186)
<b>第五章 气压伺服系统</b> .....	(193)
§5-1 概述 .....	(193)

§5-2 阀控型气压伺服控制系统理论分析·····	(193)
§5-3 活塞偏离中心点位置工作的气压伺服系统的理论分析·····	(213)
§5-4 气压伺服系统的参数对其工作特性的影响·····	(218)
§5-5 计算例题·····	(230)
主要参考资料·····	(238)



# 第一章 绪 论

## § 1-1 概 述

随着科学技术的发展,自动控制技术已被广泛地应用于工农业生产和国防建设。实现自动化的技术手段,在当前主要有两个:电气(电子)控制和流体动力控制。流体动力控制有三类:

**液压控制** 工作流体主要是矿物油。近几年又采用了一种高含水工作液体,它在伺服阀中的工作情况已有专著介绍。

**气压控制** 工作介质主要是压缩空气,其他还有燃气和蒸气。

**射流技术** 工作介质有气体也有液体,该技术在一些多管道的生产流程中得到应用。

流体动力控制三大类中,除了射流技术外,液压控制在各个工程技术领域中得到了迅速发展和广泛应用,气压控制也引起工程技术界的普遍重视。

## § 1-2 气压伺服控制系统的概况

### 1-2-1 气压伺服系统的种类和应用

随着生产过程自动化程度的提高,在气压传动普及、发展的同时,气压伺服控制系统也得到了迅速发展,愈来愈多地应用于各个方面。

一提到气压伺服控制系统(机构),人们会自然地想到冶金、化工和食品等工业中,用于一些多管道生产流程中的比例调节控制系统和程序控制系统的情况。这类气压控制主要控制主流量阀的

开启量,控制端的气体压力在 1bar 左右,而且频带很窄,只有 1~2 Hz,这是一种响应速度慢而平滑的气压伺服系统。这种气压伺服控制系统具体例子是很多的,如通常所见的由比例调节器、气动执行器及气动仪表所组成的比例调节系统。图 1-1 是一种锅炉燃烧过程的比例调节系统,它为确保锅炉输出一定压力、一定温度的蒸气质量流量,依靠压力变换器、调节器、气动执行器等来自动调节、控制进入炉膛的煤气和空气的流量大小,达到蒸气出口压力与温度等参数的恒定。这种调节系统,在工业自动化和热工仪表等有关著作中都有介绍,不赘叙。

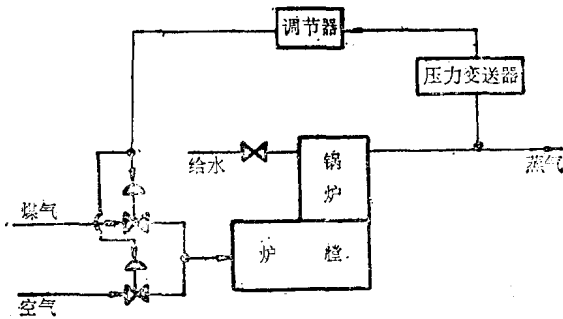


图 1-1 锅炉燃烧过程比例调节系统原理图

随着工程技术发展,对一个过程或者一个单体的控制作用要求迅速可靠、响应快、精度高、频带宽,这些要求也是气压伺服控制系统的发展趋势。现通过几个不同使用场合的气压伺服系统实例,介绍气压伺服控制的类型和应用。

### 1. 工业机械手电气-气压伺服控制系统

图 1-2 所示是一种工厂常用的压缩空气为工作介质的电气-气压伺服系统。它主要应用于工业机器人的手臂控制装置上。

该工业机械手的气压伺服控制系统可根据指令电流偏差信号(电流范围  $\pm 4 \text{ mA} \sim \pm 40 \text{ mA}$ ), 确保连接机械手臂的气压缸

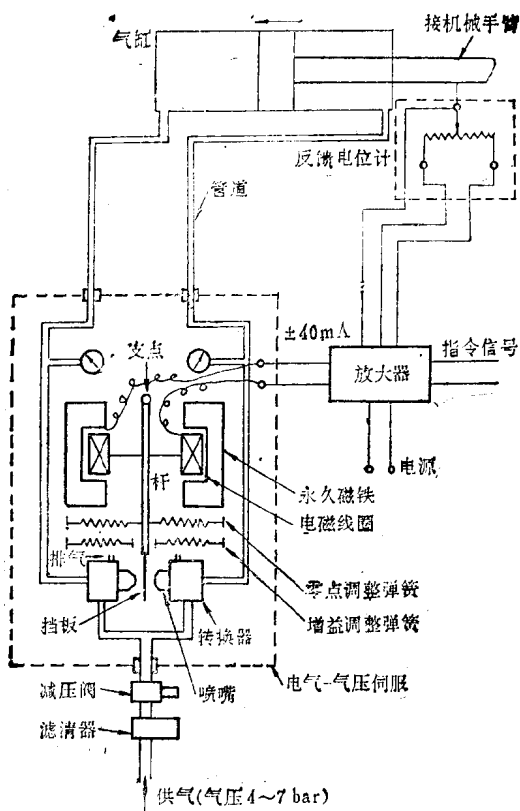


图 1-2 工业机械手电气-气压伺服系统原理图

按所要求的控制规律和定位精度工作,过程大致如下:

按图 1-2 所示,若伺服放大器输出的偏差信号(设定的指令信号与反馈信号之差)加到气压伺服阀的电磁线圈上,则永久磁铁和电磁线圈间产生相吸或相斥的电磁力,使端部装有挡板的杆件偏离中间平衡位置绕支点左右摆动,挡板使对称布置的两个转换器(结构原理见图1-3)喷嘴处的气体流量发生不均等的变化,因而造成一侧喷嘴背压腔压力升高,另一侧转换器喷嘴背压腔压力降低,则负载气缸左右腔压力不等,活塞杆(接机械手臂)移动,实现工

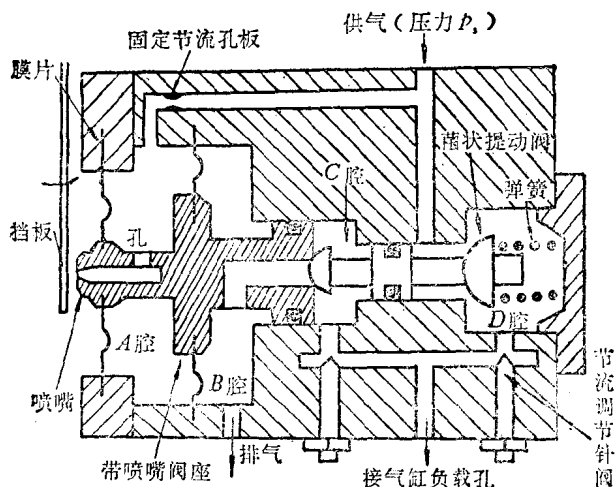


图 1-3 图 1-2 中转换器原理(右侧)

作要求的运动规律。现假定以右侧转换器为例考察其动作原理，当杆件在偏差信号作用下偏离中间平衡位置移向右侧转换器，由于挡板与喷嘴间隙减小，则随着喷嘴背压腔内压力升高，A腔压力升高，使带有喷嘴的阀座右移，把菌状提动阀推向右方，使D腔菌状阀阀口开大，而C腔的小菌状提动阀阀口关闭，这样，由进气口流入的控制气流经过节流调节针阀流向气压缸，驱动活塞杆工作；与此同时，相反一侧的左转换器（各腔符号同右侧，只是符号右上角打“'”来表示左侧，以下同），由于杆件端部的挡板与喷嘴间的间隙增加，造成左喷嘴背压腔压力降低，而使左侧带喷嘴的阀座在C'腔（与右侧C腔相对应）压力作用下向右移动，菌状提动阀在左侧弹簧力作用下使左转换器D'腔的阀关小，而C'腔的阀开大，则气缸左端与排气孔相通，压力下降，实现活塞杆（接机械手臂）向消除偏差信号方向移动（即活塞左向移动）；偏差信号为零时，左右侧两个转换器的输出相等，这样气缸活塞停止在新的相对平衡位置上。很显然，这是一个阀控气缸位置的伺服控制系统。图 1-4 表示

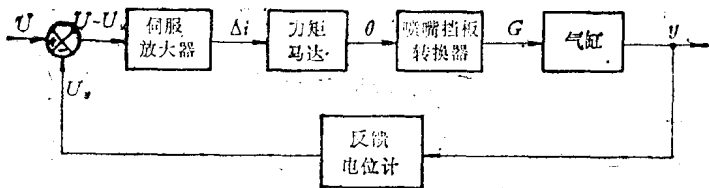


图 1-4 电气-气压位置伺服系统

该位置伺服控制系统方块图。

图 1-2 中,零位(点)调整弹簧左右端均与带挡板的杆件相联,起着机械零位调整和对中弹簧补偿作用;增益调整弹簧在偏差信号为零时(即输出压力处于平衡状态时),不与杆件接触,当偏差信号超过某一数值后才接触。它的作用是根据偏差信号大小改变补偿流量增益的变化,确保气缸定位精度的稳定。另外,采用喷嘴挡板控制的菌状提动阀,抗污染性能强,不容易堵塞。

这种低气压伺服控制系统应用实例,除了作为机械手臂用于自动喷涂作业外,还可用于自动焊接、自动供料装置的机械手

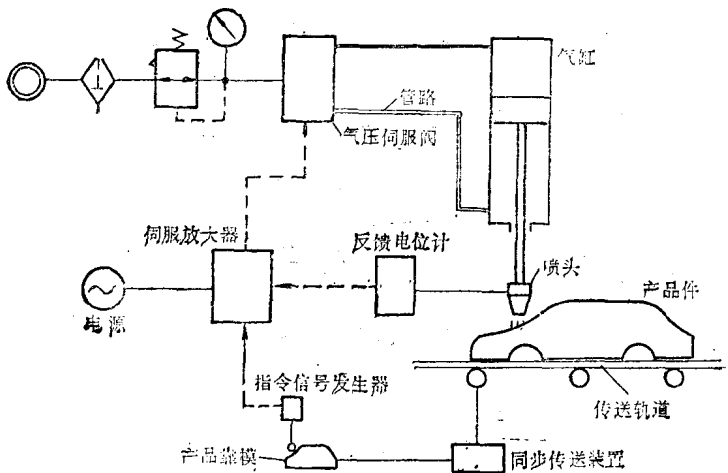


图 1-5 气压伺服控制系统应用实例(自动喷涂)

中。图 1-5 表示自动喷涂的气压伺服控制机械手原理。该工业机械手气缸活塞重复定位精度  $\pm 0.5 \text{ mm}$ 。

图 1-6 表示一种自动送料系统，它能按指令信号，当每取走一个零件后，依靠气压伺服控制系统控制零件外露高度不变。

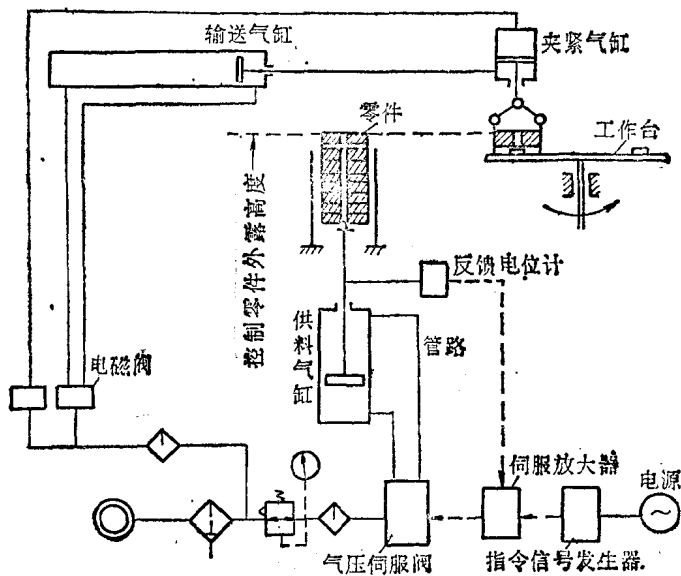


图 1-6 零部件自动送料气压伺服系统

## 2. 燃气伺服控制系统

某些导弹、火箭常采用燃气为工质的气压伺服系统，控制飞行体喷气发动机推力矢量来达到所需飞行姿态。图 1-7 是控制飞行体主推力喷管方向的燃气伺服系统原理图。图 1-8 表示飞行体姿态控制燃气伺服系统，在该系统内有一个燃气发生器，当燃气发生器内固体燃料点火燃烧后，获得的高压、高温燃气经二级减压阀减压到射流管伺服阀的工作压力，通过燃气射流管伺服阀（见图 1-9）控制气流，驱动执行元件——膨胀型燃气叶片马达（如图 1-10 所

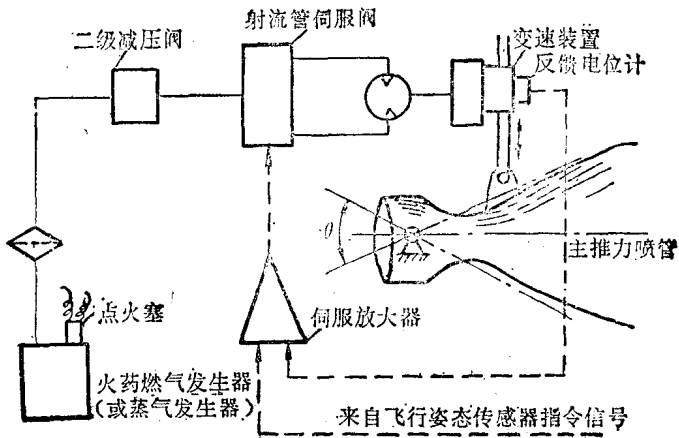


图 1-7 燃气伺服系统(推力矢量控制)原理

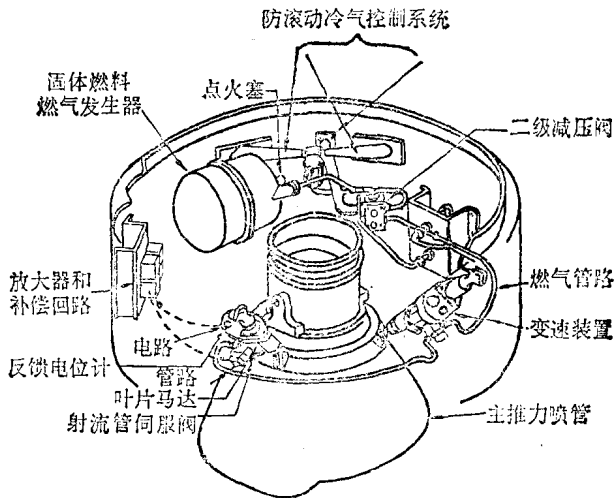


图 1-8 姿态控制燃气伺服系统

示)工作,实现主推力喷管方向的改变,完成飞行姿态控制。该燃气伺服系统的主要参数如下:

燃气发生器内气体压力:136~138 bar; 燃气温度:1035℃;

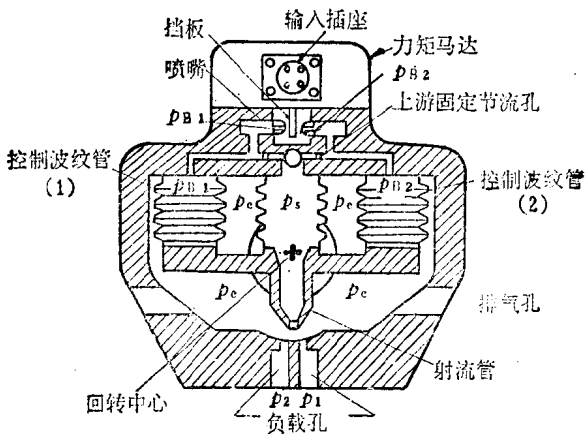


图 1-9 燃气射流管伺服阀构造原理

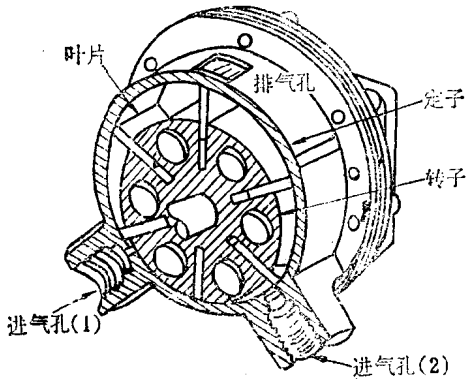


图 1-10 膨胀型燃气叶片马达构造原理

燃气伺服阀工作压力：40 bar；

推力喷管角位移输出： $\pm 3.25^\circ$ ，精度 $\pm 0.1^\circ$ ，最大摆动速度 $30^\circ/s$ ；

频带宽度：56 rad/s(约 8~10 Hz 左右，见图 1-11)。

显然，这种高温高压燃气伺服控制系统，最适用于一次性短时间内工作的装置。抗污染力强的喷嘴挡板控制的射流管阀能有效



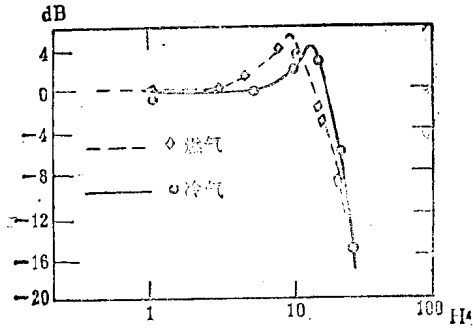


图 1-11 燃气伺服系统幅频特性

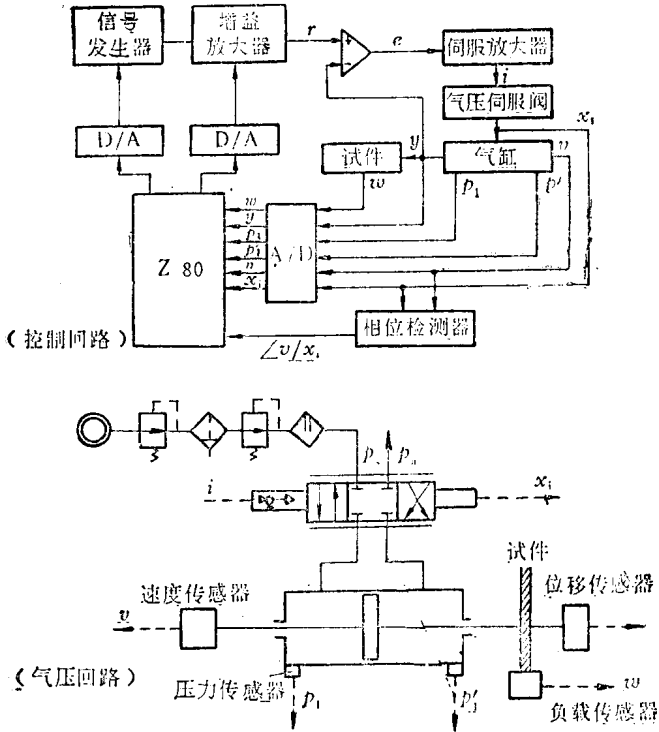


图 1-12 气压式材料疲劳试验机原理