

# 现代气动技术理论与实践 第九讲：等温容器

蔡茂林

(北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院,北京 100083)

中图分类号: TQ533

文献标识码: B

文章编号: 1008-0813(2008)04-0090-04

## 0 前言

气罐、大直径管道等气体容腔在气动系统中广泛存在, 这些气体容腔除可储存压缩空气能量从而使所需空气压缩机排气量减小以外, 还可作为缓冲器来平抑系统中的压力波动。但如本讲座第三讲“固定容器的充气”所述, 向空的容器充气或从空的容器放气的时候, 容器内的空气温度会激烈变化甚至会在短时间内变化 50℃。由于精确地把握实际的传热非常困难, 空气温度变化的预测、计算而变得异常难以处理。因此, 在气动系统的理论解析中, 气体状态变化多按易于处理的等温或绝热过程来处理。

等温容器是日本东京工业大学香川利春教授于 1995 年提出, 无论是充气还是放气时容器内空气温度都基本不变化的一种特殊容器<sup>[1]</sup>。由于利用该容器的等温性质, 可以非常容易地、精密地产生和测量非正常流量, 所以该容器在流量测量领域得到了非常广泛的应用。

本讲先说明等温容器的工作原理及其等温特性, 随后详细介绍其在非正常流量测量、非正常流量产生中的应用。

## 1 什么是等温容器

### 1.1 等温化的有利性

如果容器内空气温度一定, 对空气的状态方程式  $pV=mR\theta$  进行全微分可得:

$$G = \frac{dm}{dt} = \frac{V}{R\theta} \frac{dp}{dt} \quad (1)$$

式中 G——空气质量流量;  
m——空气质量;  
t——时间;  
V——容器容积;  
R——空气气体常数;  
 $\theta$ ——空气温度;

p——空气压力。

根据式(1), 进出等温容器的瞬时空气质量流量与容器内压力的时间微分值成正比。由于压力的测量比流量的测量远远容易, 特别是在能高频响地测量非正常流量的流量计还没有的现在, 这种间接测量法非常有用。而且, 直接测量压力微分值的压力微分计的开发也取得了很大的进展<sup>[2]</sup>。这样, 就不需对测得的压力数据进行复杂的微分滤波处理。

### 1.2 等温原理

对容器进行等温化处理, 就是将等温材料填入普通容器<sup>[3]</sup>。从传热学的角度, 对填充的等温材料具有如下的要求:

- (1) 等温材料与空气间的热传递面积充分大;
- (2) 容器内等温材料的热容量远远大于空气。

要满足以上两点要求, 等温材料只能是非常细的金属丝。考虑到耐腐蚀性以及柔韧性, 通常, 等温材料采用铜线。铜线越细, 传热面积越大, 铜线与空气间的传热也越快, 但实验表明铜线直径低于 20 $\mu$ m 时, 铜线容易断裂, 并随空气一起流出容器外进入到电磁阀等元器件中, 以致难于使用。所以实际应用中等温材料一般都是采用直径 20~50 $\mu$ m 的铜线。

表 1 是现在使用最为广泛的直径 50 $\mu$ m 铜线的等温化参数。

基于以上分析, 等温材料由于自身热容量相对容器内空气的热容量很大, 空气状态变化时的放热或吸热对其温度影响很小。而且, 其与空气的热交换面积很大, 两者间热交换非常充分迅速, 所以容器内空气温度基本可保持与铜线基本一致, 空气温度变动得到了有效抑制。

表 1 铜线等温化相关参数的计算例

参数	数值
容器体积	5dm <sup>3</sup>
铜线充填率	0.4 kg/dm <sup>3</sup> (铜线体积占有率约 5%)
铜线表面积	24m <sup>2</sup> (铜线长度 153km)
热容量的比值 铜/空气	19.3*

注: 空气压力为 0.7MPa 时的计算值。压力越低, 该值越大。

收稿日期: 2008-06-01

作者简介: 蔡茂林(1972-), 男, 教授/博士生导师, 主要研究方向是气动系统的节能、测量、仿真与控制。

### 1.3 等温性能

如前所述,等温材料的充填率越高,等温性能越好。但是,随着充填率的提高,充填铜线的成本会上升,而且,能充入容器固定容积内的等温材料也有一个限度。为此,这里改变充填率来确认其对等温性能带来的影响。图1是采用直径 $50\mu\text{m}$ 的铜线,从能最大限度地充入的充填率 $0.4\text{kg}/\text{dm}^3$ 开始,每减少 $0.05\text{kg}/\text{dm}^3$ 测一次容器放气时的容器内空气的压力变化和温度变化。放气过程的压力下降速度设定为 $0.1\text{MPa}/\text{s}$ ,放气过程中某一时刻的容器内空气温度采用止停法测量<sup>[9]</sup>。

图1中的“Cu-0.40”表示铜线的充填率为 $0.4\text{kg}/\text{dm}^3$ ,其他以此类推。如图1所示,充填率低的放气,在放气初期压力下降很快,而在放气后期变慢。特别是完全没有充入等温材料,即全空的容器的放气的压力响应与充入等温材料容器的放气的压力响应差别很大。这也说明,即使是充入少量的等温材料,对压力响应的影响也很大。关于放气中的温度变化,全空容器放气时,容器内空气温度下降 $46\text{K}$ ,低于 $0^\circ\text{C}$ ,以致安装在容器下流的电磁阀处发生结露。与此形成对照的是,进行了等温化处理的等温容器,在充填率 $0.4\text{kg}/\text{dm}^3$ 时温度下降仅为 $1\text{K}$ 。

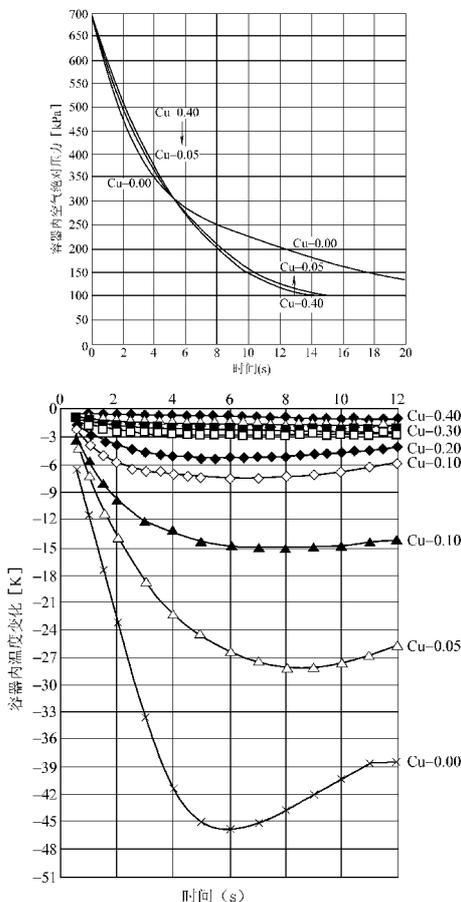


图1 不同充填率下的压力变化和温度变化

由图1可见,在压力下降速度为 $0.1\text{MPa}/\text{s}$ 时,要使等温容器内的温度控制在 $1\%$ 以内,即绝对温度变化 $3\text{K}$ 以内,充填率需在 $0.25\text{kg}/\text{dm}^3$ 以上。因此,对某一压力变化值,只要往容器中填入适当比率的等温材料,就可使其内部的温度变化控制在 $1\%$ 以内。这样的容器被称为“等温容器”。等温容器内部空气的温度可按大气温度定值来处理。

## 2 等温容器的应用

### 2.1 气动元器件流量特性的测量

根据ISO6358,气动元器件的流量特性由声速流导和临界压力比来表示,并通过固定上流压力或使下流向大气开放,调节流路抵抗来调节流过被测元器件的上下流压力和流量,再用流量计测量定常流状态下的流量,来测量被测元器件的流量特性<sup>[9]</sup>。由于绝大多数的流量计动态响应差,这种方法只能是逐一测量指定压力条件下的静态流量,需逐点测量,所以测量时间长,耗气量大,且需要量程比非常高的流量计或几个流量计。

但如果采用等温容器,使等温容器中预先充好的压缩空气通过被测元器件向大气放出,利用等温容器的特点,不用流量计,仅测量容器内压力变化即可测量整个放气过程中任意时刻的瞬时流量。这种测量方法测量的流量可达到 $1\%$ 精度,并在一次放气过程中就可测出被测元器件的压力-流量关系曲线,耗气量少,测量时间只需十几秒钟<sup>[9]</sup>。

该种测量方法的测量回路如图2所示。测量步骤如下:(1)通过减压阀调定供气压力向等温容器中充气;(2)关闭供给管路上的截止阀,用计算机控制打开被测元器件前的电磁阀,使等温容器内的压缩空气通过被测元器件向大气放气。与此同时,将容器内压力记录到计算机;(3)等容器内压力降到大气压,关闭被测元器件前的电磁阀,结束测量。

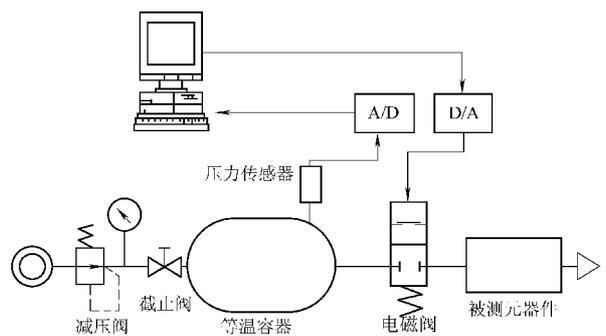


图2 利用等温容器的气动元器件流量特性测量装置

记录的容器内空气压力变化的波形如图3所示。根据式(1),对此波形进行微分可得到该图下方的压力-流量特性曲线。根据这个特性曲线,可求出被测元器件的声速流导和临界压力比。实验结果表明,该方法测量的声速流导的误差在2%以内,临界压力比的误差在±0.05以内<sup>[6]</sup>。

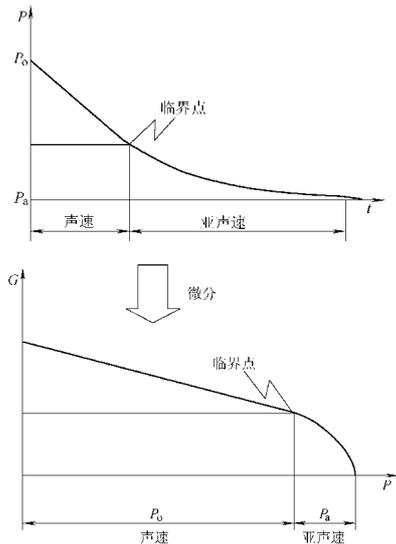


图3 放气时的压力响应和压力-流量特性曲线

以上的流量特性测量方法仅通过测量压力即可实现,测量时间短,耗气量少,实用性非常高。该方法与ISO 6358规定的逐点静态测量方法相比,测量时间缩短约70%,耗气量减少95%以上。现在,该方法作为ISO 6358修正案的替代实验法正在审议中。

### 2.2 气动元器件空气消耗量的测量

气动喷枪、气动工具等在气动系统中耗气比重高的气动元器件,其空气消耗量的测量和把握对于气动系统的节能非常重要。但是,无论是测量大流量,还是波动幅值大、瞬时变化的流量在实际中都并非易事。因此,在工业现场,对使用过程中耗气流量不断快速变化的气动工具等的空气消耗量,基本上都处于无法测量状态。如果利用等温容器,它们的测量将变为可能<sup>[6]</sup>。

测量装置如图4所示,由层流式流量计、等温容器

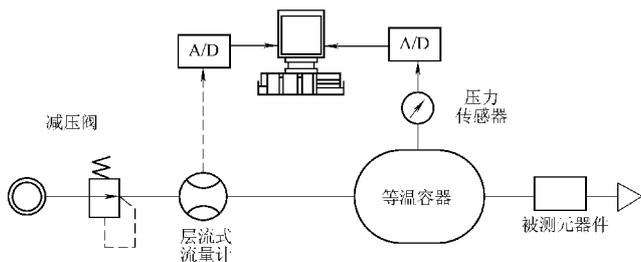


图4 利用等温容器的空气消耗流量测量装置

和被测元器件等构成。这里,等温容器起到平缓压力变

化、从而平缓流过层流式流量计流量的作用。流入等温容器的流量用层流式流量计测量,流入流出等温容器的瞬时流量差用等温容器内的压力变化来测量。这样,二者之和就是被测元器件的瞬时消耗流量。

图5是用以上测量装置测量气动改锥空气消耗流量的结果。气动改锥启动时,等温容器迅速发挥缓冲作用,等温容器内压力迅速下降,净流出流量大。随后,等温容器内压力逐渐趋稳,净流出流量趋于零,气动改锥消耗流量与层流式流量计的流量变为一致。图中横坐标为4.5s时停止气动改锥后,由于此时气动改锥消耗流量为零,通过层流式流量计的流量全部用于充填等温容器,进入等温容器的流量与流过层流式流量计的流量基本一致。

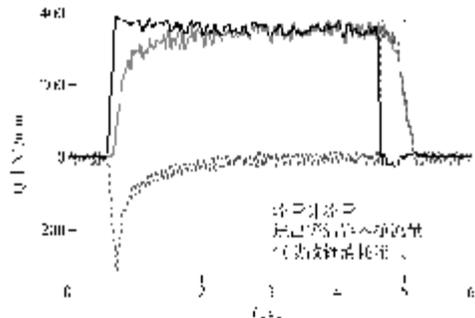


图5 气动改锥的空气消耗流量的测量结果

本测量装置和测量方法对定常流的测量精度可达1%,对频率100Hz以内的非定常流的测量精度可达5%<sup>[6]</sup>。

### 2.3 非定常流量的产生

近些年,为了实现高精度、高频响的气动伺服控制系统,瞬时流量的测量和反馈变得十分重要。高频响流量计的开发逐渐趋热,流量计特性的测量和校正也变为必要。但是,由于气体的密度是温度和压力的函数,非定常流量的测量极其困难。而且,气体用流量计的动特性测量方法也未确立,也缺乏相应的国际标准。因此,在市场上销售的流量计响应性能的评价及校正都存在很大的问题。利用等温容器的非定常流量产生装置有利于该问题的解决<sup>[7]</sup>。

非定常流量产生装置的构成如图6所示。由于等

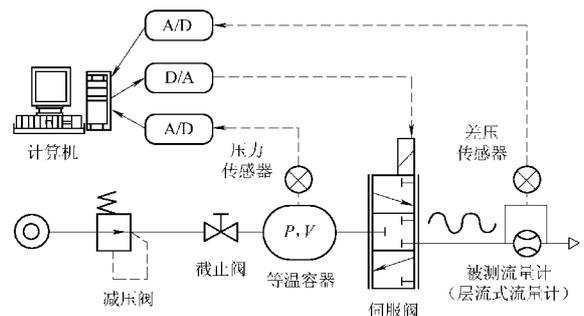


图6 利用等温容器的非定常流量产生装置

## 参 考 文 献

- [1] 香川,等.温化压力容器を用いた有効断面積の計測法[J].油圧と空気圧,1995,26(1):76-81.
- [2] 加藤,川嶋,香川,等.温化压力容器を応用した圧力微分計の提案[M].計測自動制御学会論文集,2004,40(6):642-647.
- [3] 蔡茂林.固定容器的充放气[J].液气气动与密封,2007,27(3):43-47.
- [4] 蔡茂林.气动元件的流量特性[J].液气气动与密封,2007,27(2):44-48.
- [5] 香川,蔡.空気圧機器の流量特性の表示方法と試験方法についての新提案:代替試験法(2)-等温化放出法[J].油空圧技術,2004,42(12):58-64.
- [6] 船木,等.温化压力容器を用いた空気圧機器消費流量測定装置の開発[J].フルードパワーシステム学会論文集,2005,36(3):39-44.
- [7] 川嶋,藤田,香川,等.温化压力容器を用いた空気の非定常流量発生装置[J].計測自動制御学会論文集,1998,34(12):1773-1778.

温容器的放气流量与容器内压力变化成正比,根据目标放气流量可以计算出容器内压力变化的目标曲线,再控制下流的伺服阀来对容器内压力按目标曲线进行控制,就可得到设定的目标放气流量。

图7是用非定常流量产生装置测量层流式流量计特性的结果。非定常流量产生装置产生的为平均流量40NI/min,振幅30NI/min,频率30Hz的正弦波流量。层流式流量计测得的流量与流量产生装置产生的流量非常吻合。实践表明,以上非定常流量产生装置可在5%精度范围内产生频率100Hz的非定常流量。

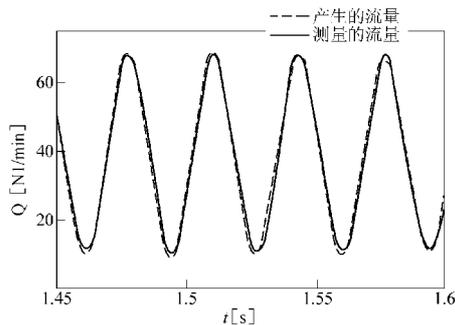


图7 非定常流量产生装置产生的流量

## “液压技术在冶金工业的应用研讨会”在燕山大学举办

“液压技术在冶金工业的应用研讨会”于2008年5月7~8日在燕山大学举办。本次活动由中国机械工程学会流体传动与控制分会与博世力士乐(中国)有限公司主办,燕山大学协办。参加研讨会的有来自各大钢铁设计院、钢铁公司、高校和科研院所、液压元件和系统生产厂等相关人员160余位代表。本研讨会旨在推动国内冶金装备自主开发进程和技术进步,是促进产学研合作、促进流体传动与控制技术工业化的一个重要活动。本次研讨会向与会的相关人员介绍了液压技术、自动化和电子技术在冶金工业领域的新理念、新技术、新元件、新系统。

会议由分会副主任兼总干事郭洪凌先生、分会常务委员博世力士乐(中国)有限公司培训总监王长江先生共同主持,分会副主任孔祥东先生、黄人豪先生,博世力士乐(中国)刘火伟总经理、杨辉先生、罗选民先生等出席本次研讨会,并做技术报告和演讲。本次研讨会特别邀请博世力士乐公司德国总部的3位专家做了专题技术报告。

研讨会特别邀请分会副主任委员燕山大学孔祥东副校长介绍了他们研制的锻液压机液压控制系统

的组成、原理、及其特有的工作特性及功能的实现。博世力士乐公司的专业技术人员,介绍了用于结晶器和AGC的现代液压系统及其仿真、HNC和MAC8电子控制系统及其在中国冶金设备中的应用、用于冶金设备的博世力士乐伺服阀和高频响比例阀及其特点、AGC油缸、F系列A4VSO油泵及其应用和液压轴技术等。博世力士乐做为世界领先的传动、控制和动力解决方案供应商,充分利用不同技术领域,如液压,电力传动和控制,线性与组装技术以及气动等方面的实际知识,将它们融会贯通,并提供服务网,从而打破特定技术的限制,作为先进技术的代表,在传动与控制领域声誉卓著,其有许多先进的经验和技能是值得我们学习和借鉴的。

孔祥东先生做总结性发言,对本次研讨会给予了极高的评价:此次会议是一次非常成功的研讨会,是一次融理论与实践于一体、集产学研于一体的空前的研讨会。几位主讲人准备充分,讲解生动,体现了丰富的实践经验和高深的理论水平。研讨会准备充分,主持精彩,会议进行得紧张有序,现场气氛活跃,互动效果极佳。参会人员非常认真地学习研讨,纷纷表示此行收获颇丰。