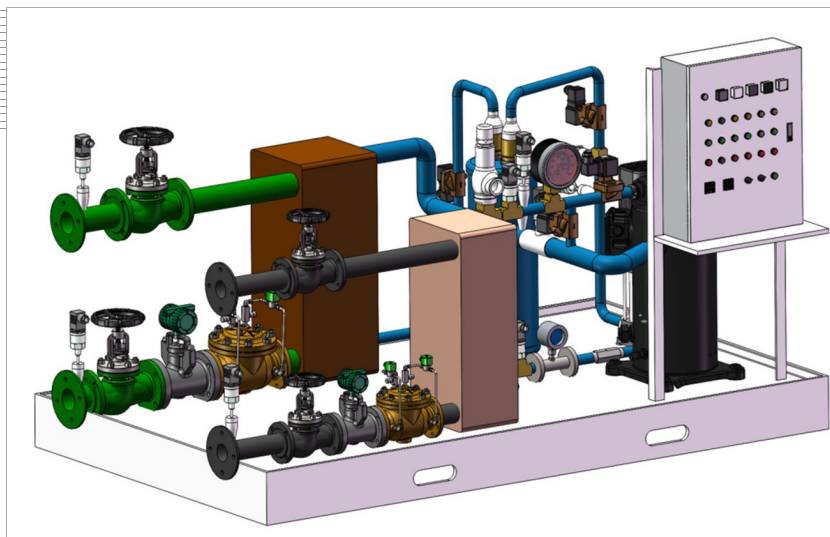


武汉理工大学“十三五”规划教材

热工实验原理与装置

甘念重 吴洁 阮智邦 主编
李捷 主审



人民交通出版社股份有限公司

北京

FOREWORD 前言

本书为武汉理工大学本科“十三五”规划教材,包含能源动力类专业基础课程《工程热力学》与《传热学》的相关实验及实验设备,是指导本科生热工实验教学的专用教材,适用于能源与动力工程、轮机工程、油气储运等本科专业。

本书的编写围绕“热工参数测量仪器”“热工基础实验原理”和“综合试验装置及系统”三个层次展开,有利于学生分层次进行学习,掌握热工实验的基本测试方法,提高学生的实验操作能力及动手能力,加深对相关理论知识的理解。“热工测量实验仪器”覆盖第1章至第6章的内容,主要涉及热工参数的基本测量方法,为后续的实验操作及综合实验设计奠定了良好的基础。“热工基础实验原理”涉及第7章的内容,学生在学习相关的理论知识之后,可结合本教材讲述的实验方法和实验仪器,在实验室完成相关的实验项目,加深学生对理论知识要点的理解。“综合试验装置及系统”包含第8章和第9章的内容,学生可结合本教材提供的实验方案和系统原理,在老师的指导下设计和组织实验,并完成相应的测试报告,以利于提高学生解决实际问题的能力。

全书共分为9章,第1章和第4章由吴洁老师编写,第2章和第5章由阮智邦老师编写,第3章和附录由姚志敏老师编写,第6章由张彦老师编写,第7章、第8章和第9章由甘念重老师编写。全书由李捷老师审校,最后由甘念重老师统稿并修改定稿。在本书的编写过程中,得到了武汉理工大学船海与能源动力工程学院众多教师的帮助和指导,同时哈尔滨市鸿润教学试验设备厂、锦州阳光气象科技有限公司、东莞绿光新能源科技有限公司等厂家提供了相关仪器设备的插图及使用说明,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平和条件所限,书中难免有不妥或者疏漏之处,恳请读者批评指正。

编者
2023年9月

第一章 热工参数检测基础	1
第一节 热工检测的基本知识	1
第二节 测量误差及仪表等级	5
第三节 检测装置的组成及类别	12
第四节 热工基本测量参数	16
第二章 温湿度检测仪表	20
第一节 膨胀式温度计	21
第二节 热电式温度计	27
第三节 辐射式温度计	33
第四节 其他类型测温仪表	38
第五节 湿度测量及仪表	42
第三章 压力检测仪表	47
第一节 液柱式压力计	47
第二节 活塞式压力计	49
第三节 弹性式压力计	51
第四节 电气式压力计	55
第四章 物位检测仪表	60
第一节 玻璃式液位计	60
第二节 浮力式液位计	62
第三节 静压式液位计	65
第四节 电容式物位计	69
第五章 流量检测仪表	72
第一节 差压式流量计	72
第二节 转子流量计	75
第三节 涡轮流量计	78
第四节 皮托管流量计	79
第六章 辐照度检测仪表	83
第一节 太阳辐射测量仪	83
第二节 光合有效辐射表	87
第三节 照度计	89
第七章 热工基础实验	93
第一节 二氧化碳 $p-v-T$ 关系的测定实验	93

第二节	喷管特性实验	97
第三节	稳态平板法测定绝热材料导热系数实验	103
第四节	水平管外自然对流换热实验	107
第五节	换热器综合实验	111
第六节	强迫对流管簇管外换热系数的测定实验	115
第七节	中温辐射时物体黑度的测定实验	119
第八节	气体定压比热测定实验	123
第九节	液体导热系数测定实验	127
第十节	半导体制冷及热电效应实验	130
第八章	热工性能测试试验装置	135
第一节	换热器性能综合测试试验台	135
第二节	制冷压缩机性能测试试验装置	142
第三节	房间空调器性能测试试验装置	148
第四节	太阳能集热器性能测试试验装置	154
第五节	自动气象环境监测试验装置	158
第九章	热工设备结构及系统	168
第一节	间壁式换热器结构认知	168
第二节	制冷压缩机结构认知	174
第三节	工业锅炉结构认知	182
第四节	有机朗肯循环(ORC)低温余热发电系统	200
第五节	船用天然气发动机及燃料系统	214
附录	236
附录一	常用单位换算表	236
附录二	热工设备及测量常用英文缩写词	238
附录三	干湿球温度计测定相对湿度对照表	241
附录四	干湿球温度计测定水蒸气分压力对照表	243
附录五	传热系数经验数值	244
附录六	饱和水蒸气压力表	245
附录七	气体的平均比定压热容	247
附录八	气体的平均比定容热容	248
参考文献	249

第一章

热工参数检测基础

第一节 热工检测的基本知识

检测技术是专门研究检测原理、检测方法和检测工具的科学。在从事科学研究、工程技术及其他生产活动的过程时,为取得各种事物之间的定量关系,必须进行检测。针对不同的科技和生产领域,需要具备不同的检测项目和检测特点。

其中,热工检测是指在热工过程中对各种热工参数,比如温度、压力、流量、物位等的测量。通过热工检测可以及时反映热力设备以及热力系统的运行工况,为操作人员提供操作的依据,并且为热工自动控制准确、及时地提供所需要的信号。因此,热工测量是保证热力设备安全、经济运行及实现自动控制的必要手段。

一、基本术语

1. 被测量

被测量是指作为测量对象的特定量。可以是已知量,也可以是待测量。本书所指的被测量均是指热工参量,即温度量、压力量、流量量、物位量以及辐射量。

2. 显示

在模拟检测仪表中,显示就是通过在仪表刻度盘上读出标记的位置。显示也可以是数字值(对于数字仪表),也可以根据被测单位的不同描述,用刻度分度、长度单位或数字间隔来表示(如光柱显示仪表)。

3. 显示范围

热工检测装置的显示范围就是热工显示仪表所能读出的检测值范围,即仪表的刻度范围。

4. 检测范围

检测范围是指测量仪器的误差处在规定的极限内的一组被测量值。在检测范围内,仪表的检测误差应保持在规定的误差限以内。检测范围的上限、下限分别可称为上限值、下限值。

5. 检测值

在检测时,由显示得到的数值。其以数字与被检测量单位乘积的形式给出。

6. 检测结果

检测结果是指由测量所得到的被测量值,包括示值、未修正的测量结果和已修正的测量

结果。

7. 检测装置

检测装置是指所有用于检测的仪表、部件、设备的总称,包括采集检测值的检测器(传感器)、运算仪、放大器和用于表达显示量的输出仪表。

8. 检测系统

检测系统是指组装起来以进行特定测量的全套测量仪器和其他相关设备。除了包括检测装置外,还包括所有影响检测方式的过程。

9. 检测仪表

检测仪表是指组成检测装置的部分或全部组件。

10. 检测原理

检测原理是指检测方法的科学基础,即为检测时所基于的特征、物理现象,例如被测量温度,当用热电偶测量时,其检测原理是热电效应。

11. 检测方法

检测方法是指进行测量时所用的,按类别叙述的一组操作逻辑次序。即检测方法可按不同方式分类,如替代法、微差法、零值法。

12. 灵敏限

灵敏限是指引起仪表示值可见变化的被测变量的最小变化值,也可理解为当检测值超过一定值时,检测仪表才开始显示,灵敏限就是这个值以下的范围。一般来说,检测仪表灵敏限数值应不大于仪表允许误差绝对值的一半。

13. 灵敏度

灵敏度是指测量仪器响应的变化除以对应的激励变化。例如指针式仪表的灵敏度可以理解为单位被测量所引起的指针偏移的刻度。

14. 分辨率

分辨率是指可以使仪器显示出最小的测量变化量,也表征仪器的灵敏度限。一般仪器的分辨率应小于仪器允许绝对误差的一半。

15. 精确度

精确度也叫精度,由准确度和精密度综合决定。准确度是指仪器显示值与被测量物理量真值的偏离程度,反映了测量装置的系统误差大小。而精密度是指仪器测量结果的分散程度。应该指出,一个测量系统准确度高,未必精密度就高;而精密度才能真正反映仪器的综合性能。

二、热工检测的基本方法

热工参数检测离不开敏感元件,而敏感元件又是按照一定的原理把被测变量的信号转换成一种可进一步进行处理或显示的信号。这个转换过程一般均利用了光电、热电、电磁、压电、应变及压阻等诸多效应或物理现象。因此,热工参数的检测就是利用敏感元件特有的物理、化学和生物等效应,把变化的被测量转换为敏感元件某一物理(或化学)量的变化原理进行检测。测量是一项实验工作,为了获得准确可靠的数据,必须合理地选择测量方法。测

量方法很多,下面按照不同的依据对方法进行分类。

1. 按照获得测量参数最后结果的程序不同分类

(1)直接测量:就是将被测量直接与同性质的标准量(测量单位)进行比较,其测量结果可以直接从测量仪表上读得的方法。例如用尺测量长度,用玻璃管水位计测量水位等,都是直接测量的例子。

(2)间接测量:就是已知被测量与某一个或若干个其他量具有一定的函数关系,通过直接测量这些量值,再用函数关系式计算出被测量值的测量方法。例如,通过测量长度、宽度求面积,测量导线电阻、长度及直径求电阻率,这里对面积、电阻率的测量都是间接测量的结果。

2. 按照检测装置的动作原理不同分类

(1)直读法:被测量作用于仪表比较装置,使比较装置的某种参数按已知关系随被测量发生变化,由于这种变化关系已在仪表上直接刻度,故可直接由仪表刻度尺读出测量结果。例如,用玻璃水银温度计测量温度时,可直接由水银柱高度读出温度数值。

(2)零值法(平衡法):就是将被测量与一个已知量进行比较,当两者达到平衡时,仪表平衡指示器指零,这时已知量就是被测量值。例如,用天平测量物体重量,用电子电位差计测量电势都是零值法的测量方法。

(3)微差法:当被测量尚未完全与已知量平衡时,读取它们之间的差值,由已知量和差值可求出被测量值。用不平衡电桥测量电阻就是微差法测量的例子。

3. 按照仪表是否与被测对象接触分类

(1)接触测量法:仪表的一部分与被测对象接触,受到被测对象的作用才能得出测量结果的测量方法。如用玻璃管水银温度计测温度时,温度计的温包应置于被测介质之中,以感受被测温度信号的高低。

(2)非接触测量法:仪表的任何部分都不与被测对象直接接触就能得到测量结果的测量方法。如光学高温计测温,是利用测温对象所产生的热辐射对仪表的作用实现测温,因此仪表不必与对象直接接触。

4. 按照敏感元件所特有的效应不同分类

(1)机械检测法:其原理是利用敏感元件,将被测量转换成机械位移或形变的方法(也称力学法)。例如压力检测中,利用弹性元件可以将压力转换成弹性元件的位移;在流量检测中利用节流件将流体的流速变换成节流件前后的压差。

(2)电学检测法:其原理是利用敏感元件,将被测量的变化转换成电压、电阻、电容等电量的方法。例如用热敏电阻的阻值变化检测温度;利用热电效应的热电偶,将温度信号变成热电势来测量温度。

(3)声学检测法:其原理是利用超声波在介质中的传播以及在介质间界面处的反射等性质进行参数检测的方法。例如利用超声波在流体中沿顺流和逆流方向传播的速度差来检测物体的流速。

(4)光学检测法:其原理是利用光的发射、透射、折射和反射定律的性质,以及用光强度等光学参数来表示被测量变化大小的方法。例如辐射式温度计、红外气体分析器就是利用

光学检测法进行温度和气体成分分析的。

(5)电磁检测法:其原理是利用被测介质有关磁性的差异,以及被测介质或敏感元件在磁场中表现出的特性来检测被测参数的方法。例如导体、流体流经磁场时,由于切割磁力线使流体两端面产生感应电势,其大小与流体流速成正比的原理进行流量检测的电磁流量计;利用电阻或热电偶的电阻值或电压随温度的变化而变化的性质,把温度量变成电流量,通入磁电势仪表中使仪表的动圈产生偏转来测量温度的动圈式测量仪表,也是属于利用磁学法进行温度检测。

(6)射线检测法:其原理是利用放射线(如 γ 射线)穿过介质时部分能量会被物质吸收,吸收程度与射线所穿过的物质层厚度、物质密度等性质有关的特性来检测热工参数的方法。例如,利用射线检测法可实现物位检测,也可以用来检测混合物中某一组分的浓度。

三、热工检测的基本框图

为便于对热工检测的初步理解,列出一个理想的热工检测系统原理图,如图 1-1 所示。

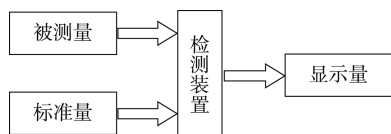


图 1-1 热工参数检测系统原理图

该原理图表达了热工参数的采取和再现的情况。通过在检测装置中引入有关标准的信息得到了象征性的表达。此原理图的理想化是指检测过程中只受被测量和标准量这两方面的影响。不考虑其他任何干扰的影响,也就是说无论哪种干扰的影响在这里都暂且忽略不计。

由图 1-1 中可以看出,来自被测量所属过程的信息是由检测装置传递到显示器的。

四、检测环境条件对热工检测结果的影响

在实际检测中,图 1-1 所示的理想检测系统是不存在的,任何检测结果都要受到检测系统内部(仪表)和外部(环境)的干扰,因而在检测过程中不可避免地要发生信息损失,使测量结果出现误差。

检测技术的主要任务之一就是要减少这个误差。长久以来,由于对仪表的结构原理、材料及加工工艺和检测方法等方面的多方研究,甚至对操作者的心理和生理特征也有所考虑,因此出现许多高级仪表(如高精度智能化仪表),可精确地显示出其本身所能检测到的参数。但是,仪表所感受到的参数与被检测对象的实际参数是否一致,是极重要的问题。仪表制造厂很难保证这个参数的一致性,这是因为使用条件和对象特性对检测结果会有很大影响。此外,在检测中往往存在外界的干扰,如环境温度、湿度和压力的变化、震动、杂散电磁场的作用等。仪表制造厂只能考虑部分防护,这会增大仪表的误差。

任何检测过程都会带来检测误差,只不过在从事检测的实际工作中应尽量足够地分析产生误差的根源,以减少误差出现的概率。

五、仪表的检定

检定是为了评定仪表的计量性能,并与规定的指标比较,以确定仪表是否合格。进行检

定工作应遵循国家法定性技术条件,即国家计量检定规程。规程详细规定了被检仪表的技术条件;检定用的标准测量器具和设备;检定项目、方法和步骤;检定结果处理;检定证书的格式和填写要求等。

检定方法一般可分为定点法和示值比较法两类。定点法是提供被检仪表测量所需的某种标准量值,例如已知的某种纯金属相变点温度、标准成分气样等,从而确定仪表的示值误差。工业上常用的是示值比较法,就是用被检仪表与标准仪表同时去测量同一被测量,比较两者的指示值,从而确定被检仪表的基本误差、回程误差等质量指标。一般要求标准仪表的测量上限应等于或稍大于被检仪表的测量上限。标准仪表的允许误差为被检仪表误差的 $1/10 \sim 1/3$ 。在这种情况下,可以忽略标准仪表的误差。将标准仪表的指示值作为被测量的真值。检定点常常取在仪表标尺的整数分度值(包括上、下限)上和经常使用的标尺刻度附近,必要时可适当增加检定点。

第二节 测量误差及仪表等级

一、基本概念

1. 检测误差

检测过程一方面是采集和表达物理量,另一方面则是与标准计量器具相比较。在与标准计量器具进行比较的过程中,由于检测方法的不完善,检测工具的不精确,检测过程中条件的波动(外部干扰),检测者知识经验的限制,以及操作不当等原因,不可避免地会造成检测结果与被测量的真实值之间存在着一定的差值,这个差值称为检测误差。也就是说,检测结果与被测量的真值之间的差,用 Δx 表示,其值为:

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1-1)$$

式中: x ——检测结果(如仪表指示值),称为检测值;

x_0 ——检测时被测量的真实量值,称为真实值(准确值)。

真实值是通过无误差的检测仪器指示出的检测值,实际无误差的检测仪器是很难做到的。所以该值是通过跟标准作比较或通过一个具有更高准确度的标定仪器进行标定而得到的。

检测误差 Δx 或大,或小,有正,有负,有单位。其大小和正负分别表示检测值偏离真实值的程度和方向。例如一个被检测温度的实际值为 100°C ,用温度计测得的指示值为 101°C ,其检测误差为 $+1^\circ\text{C}$ 。这是正误差,表示仪表指示高 1°C 。

2. 修正值

修正值是为消除系统误差用的,与误差数值相等,但符号相反的值。所以有时又叫更正值、校正值或改正量,是检测中常用的一种表示方法,用符号 c 表示,即:

$$c = x_0 - x = -\Delta x \quad (1-2)$$

在热工检测中,某一仪器的修正值是用上一级标准仪器比对后给出的。比较准确的仪器常以表格、曲线或以公式的形式给出。

二、检测误差的分类

1. 按检测误差的性质分类

1) 系统误差

系统误差是指在重复条件下,对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值与被测量的真值之差,称为系统误差。

系统误差的特点是:在同一实验室,其误差值的大小及符号或是固定不变,或是按一定规律变化,并且可以采用更正值或补偿校正的办法几乎完全可以消除。例如,可以用修正值消除刻度误差。而那些与某种因素成函数关系的,有规律的系统误差,只要认识其规律就可以采用校正补偿的方法予以减小或消除。例如动圈式仪表中永久磁铁气隙中的磁感应强度随温度的变化,是与温度有关的,是有规律的系统误差,可以采用磁分流器的办法进行温度误差校正,应变片电阻随温度的变化,可以用在电桥中加温度补偿片的办法进行补偿。对于那些难以发现规律的系统误差,最好的校正方法是急时对仪表进行检定和校准。不难看出系统误差一般都可以通过实验或分析的方法,查明其变化的规律及产生的原因,并能在确定了其数值大小和方向后,对检测结果进行修正。在新做检测前,采取一定的措施,改善检测条件,改进检测方法,从而使误差得以减小或排除。

系统误差的大小决定检测结果的“准确度”,因为其存在歪曲了检测结果的真实目的。所以系统误差的发现和消除,对一切检测结果均具有很重要的意义。

2) 随机误差

随机误差又叫偶然误差,是指检测结果与重复性条件下,对同一被测量进行无限多次检测所得结果的平均值之差。这种误差是由许多单个影响因素随机组合而产生的。因此不知道其大小及符号,也无法事前估计。误差的这种随机摆动当然也可以由单个影响量的随机摆动产生。一般说来,最终可以重新把这些随机摆动归结为许多单个随机过程组合的结果。因此,在读取模拟测量显示值时,就一直受到随机误差的干扰。这种对读数的随机影响,其本身都是许多未加控制的附加影响因素合成的结果。

如果在已知相同的检测条件下多次重复一种检测,那么所得的检测值就会在期望值左右摆动,这种期望值是无穷多检测结果的平均值。所以随机误差虽然不能用实验的方法消除,但在多次重复检测时,其总体是服从统计规律的,从随机误差统计规律中可以了解随机误差的分布情况,并能对其做出估计。

当采用足够高灵敏度的仪器,在相同条件下,对同一未知量重复多次检测时,会发现每次检测的数据总不重复同一数值,检测数据的尾数彼此稍有差别。这是由于许多互不相关的独立因素的综合作用引起微量变化的结果。例如零件的摩擦、间隙、各种干扰、热状态的微量波动、操作者生理上察觉不出的变化等各种随机因素,使检测结果出现误差,这就是随机误差。

随机误差不能用实验的办法消除,但可以从理论上计算出其对检测结果的影响。

3) 渐变误差

随着时间做缓慢变化的检测误差称为渐变误差,通常是由于仪表的某些零部件和元器

件等在老化过程中,因物理特性发生变化而引起的。例如机械零件的内应力引起的变形,电阻和电容的老化引起的量值变化等。

渐变误差的特点是单调的缓慢变化,而且往往难以掌握其变化规律,只能通过检定的方法进行调整和校正。由于误差变化缓慢,经校正后可以在短期内保证检测精度。但经过一段使用时间后又会出现系统性的渐变误差,又需要重新进行调整,这是与一般系统误差不同的地方。因此,针对渐变误差的特点,在检测前必须对仪表和传感器做定期的检定。

4) 过失误差

过失误差指明显超出规定条件下预期的误差,是由于检测者对设备性能和环境认识不足,或因疲劳、思想不集中,甚至粗心大意导致不正确的行动而引起的。

检测条件的突然变化也会引起过失误差。对应于过失误差的检测值称为坏值,应予以剔除。没有剔除坏值的检测结果是不能采用的,因为这样的检测结果会导致错误的结论。加强检测者的责任心并进行足够的技术培训,可以减少过失误差的出现几率。当出现较大误差后,要及时分析和剔除。

总体而言,在任何一次检测中,系统误差和随机误差都是同时存在的,通常处理方式如下:

- (1) 当系统误差远大于随机误差时,则忽略随机误差,按系统误差处理;
- (2) 当系统误差小得可以忽略或已修正,则可按随机误差处理;
- (3) 当系统误差与随机误差的影响相差不多,二者均不可忽略,此时应分别按不同方法进行处理。

2. 按检测误差的来源分类

1) 设备误差

设备本身所具有的误差为设备误差,设备误差包括:标准器误差、检测装置误差和附件误差。

(1) 标准器误差。

标准器是提供标准量值的检测器具。其所复现的量值均有误差。此项误差在量值传递过程中出现。

(2) 检测装置误差。

检测装置是指在检测过程中实现被测量的未知量与已知量进行比较的设备,亦被称为比较装置。主要考虑检测装置的制造与安装中不可避免地存在误差,如读数机构中分划板的刻度误差、刻度盘的安装偏心误差、光学系统的放大倍率误差等。

(3) 附件误差。

为检测提供一些必要条件,或使检测能得以顺利进行的各种辅助设备均属于检测附件。这些附件在检测中也会出现误差。如在电测中由于转换开关热电势的影响,电源连接导线、温度检测中用的补偿导线等。

以上几项设备误差也可称为工具误差。工具误差属于系统误差,可按系统误差排除方法排除。

2) 环境误差

由于实际环境条件与规定条件不一致所引起的误差称为环境误差。环境误差包括检测时环境温度、湿度、气压、振动、灰尘、电磁场、光照射等与技术要求不一致所产生的误差。

3) 人员误差

由于检测人员主观因素和操作技术所引起的误差称为人员误差。如检测人员生理上的最小分辨力,感觉器官的生理变化,反应速度和固有习惯所引起的误差。

4) 方法误差

检测方法不完善所引起的误差称为方法误差。如经验公式、函数类型选择的近似性以及公式中各系数确定的近似性;在推导检测结果表达式中没有得到反映,而在检测过程中实际起作用的一些因素引起的误差。

方法误差也属于系统误差。因此,也可按前面所述的系统误差处理变化进行排除。

3. 按使用条件分类

1) 基本误差

计量器具在标准条件下所具有的误差称为基本误差。

任何检测仪器和传感器都是在一定的环境条件下使用的。环境条件在变化,检测误差也因环境条件(如温度、湿度、气压等)的变化而改变。这样在对传感器和检测仪表进行检定和分度时,应把所有起影响作用的外界因素控制在变化较窄的条件内[例如:温度(20 ± 5) $^{\circ}\text{C}$;电源电压($220 \pm 5\%$) V ;湿度小于80%],这个条件称为标准条件,由国家标准或企业标准文件明确规定。仪表在这种标准条件下使用所具有的误差称为基本误差,属于系统误差。

不同等级的传感器和仪表的基本误差在国家或企业标准中均有明确规定。

2) 附加误差

计量器具在非标准条件下所增加的误差称为附加误差。当使用条件偏离标准条件后,传感器和仪表必然在基本误差的基础上增加了新的系统误差,称为附加误差。

不同等级的传感器和仪表在国家或企业标准中也规定了使用条件及所允许的附加误差。

三、检测误差的表示方法

检测是在一定的物质基础上进行的,人们在实践中进行各种检测时,尽管被检测的量在理论上存在真值,但由于客观实验条件的限制,被检测的真值实际上是很难测到的,因而检测结果只能是真值的近似值,这就不可避免地存在着检测误差。检测误差可用下列几种方式表达:

1. 绝对误差

为了说明检测结果与被检测真值的近似程度,将检测结果的指示值与被检测的真值之间的差值称为绝对误差,具有与被检测值相同的量纲,可表示为:

$$\Delta x = x - A_0 \quad (1-3)$$

式中: x ——指示值;

A_0 ——真值;

Δx ——绝对误差。

绝对误差 Δx 越小,说明检测结果越接近于被检测的真值。

在实际检测中,由于难以确切地检测出被检测量的真值 A_0 ,因而,实际上在应用上式时,总是用更精确的检测办法将所测得的值来代替真值,称之为实际值 x_0 ,因为式(1-3)可改为:

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1-4)$$

按式(1-4)计算出的误差并不是客观的绝对误差,具有一定的相对近似性,这在实际使用时只带来误差的误差,因此与客观的绝对误差差别甚小。

绝对误差的特性如下:

(1)是一个具体的数值,大小与所取的单位有关。例如在温度检测中,电桥测得热电阻温度计在某一温度时的电阻值为 302.68Ω ,如用 $k\Omega$ 作单位,则 $0.30268k\Omega$ 。

(2)能反映出误差的大小和方向。绝对误差有正有负。当 $x > x_0$ 时, Δx 为正;当 $x < x_0$ 时, Δx 为负。其大小和符号分别表示检测值偏离真实值的程度和方向。例如在校验显示仪表时,仪表指示为 200°C ,用标准仪器测得的值 198°C ,那么显示仪表的绝对误差为 $+2^\circ\text{C}$ 。表示仪表在该检测点的误差大小为 2°C ,方向为正,表明仪表指示值比实际值高 2°C 。

(3)不能更确切地反映出测量的精密度和准确度。例如用水银温度计测温,温度计的指示值 50°C 时,实际值为 51°C ,其绝对误差为 -1°C ;指示值为 10°C 时,实际值为 11°C ,其测量误差也为 -1°C 。这就反映不出哪个检测准确度高,但事实上,前者的准确度比后者高。

2. 相对误差

绝对误差可以说明被检测的检测结果与真值的接近程度,但不能说明不同值的测量精确程度。为了表示和比较检测结果的精确程度,经常采用误差的相对表示形式。

绝对误差与被检测量真值的比值称为相对误差,以无量纲的百分数表示,即:

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{A_0} 100\% \quad (1-5)$$

在实际计算相对误差时,同样可以用被检测的实际值 x_0 来代替真值 A_0 。但这样在具体计算时仍不方便,因此一般取绝对误差 Δx 与指示值 x 之比来计算相对误差。当检测误差很小时,这种近似方法带来的误差可以忽略不计。

$$\gamma_x \approx \frac{\Delta x}{x} 100\% \quad (1-6)$$

相对误差的特性如下:

(1)相对误差是用百分数表示的,是一个比值,其数值大小与被检测量单位无关。

(2)能反映出误差大小和方向。

(3)能更确切地反映出检测的精确程度。

3. 引用误差

相对误差可用来比较两种检测结果的准确程度,但不能用来衡量不同仪表的质量。因为同一台仪表在整个检测范围内相对检测误差不是一个定值,随着被检测量的减小,相对误差也增大,当被检测量接近于量程的起始点时,相对误差趋于无限大。这样只用检测结果的相对误差来评价仪表的质量时会出现不合理的结论。例如用满量程为 1000°C 的 0.1 级温度

仪表测量 100°C 的温度,其绝对误差不超过 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$,而相对误差不超过 $\pm 1\%$;当改用满量程为 100°C 的 0.5 级的温度仪表检测同一被测量时,绝对误差不超过 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$,其相对误差则不超过 $\pm 0.5\%$,比较检测结果,发现等级低的仪表检测结果准确度反而高。

为了更合理地评价仪表的检测质量,采用了引用误差的概念。人们将检测的绝对误差值与测量仪表的上量限(满度值) x_m 的百分比定义为仪表的引用误差,用符号 γ_0 表示,即:

$$\gamma_0 = \frac{\Delta x}{x_m} 100\% \quad (1-7)$$

引用误差去掉百分号后常用来表示热工检测仪表的准确度等级。

4. 允许基本误差

用热工检测仪表进行计量检测时,为了判断热工检测仪表的示值基本误差是否在合格范围内,通常需要用到仪表的允许基本误差这一概念。

热工检测仪表的示值基本误差是指仪表的指示值与实际值的偏差。所以热工仪表的示值基本误差就是仪表的绝对误差。

热工检测仪表的允许基本误差是指在一定准确度等级下所允许产生的最大绝对误差,在数值上等于仪表准确度等级的百分数乘以仪表的检测范围。用符号 $\Delta x_{允}$ 表示,即

$$\Delta x_{允} = \pm a\% (x_{max} - x_{min}) \quad (1-8)$$

式中: $\Delta x_{允}$ ——热工检测仪表的允许基本误差;

a ——热工检测仪表的准确度级别;

x_{max} ——热工检测仪表的测量上限;

x_{min} ——热工检测仪表的测量下限。

例如有一温度检测仪表,准确度等级为 0.5 级(0.5%),检测范围为 $0 \sim 800^{\circ}\text{C}$,该仪表的允许基本误差应为:

$$\begin{aligned} \Delta x_{允} &= \pm a\% (x_{max} - x_{min}) \\ &= \pm 0.5\% \times (800 - 0) = \pm 4^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

热工仪表的示值基本误差不允许超过允许基本误差。也就是说任何合格的仪表,其示值基本误差必须小于或等于允许基本误差,即:

$$\Delta x \leq \Delta x_{允} \quad (1-9)$$

以上不难看出热工仪表的示值基本误差和允许基本误差是评定仪表合格与否的重要指标。

四、测量的精密度、正确度和准确度

上述误差都会使测量结果偏离真值,通常测量结果与真值的接近程度是用精密度、正确度和准确度来衡量的。

(1) 精密度。对同一被测量进行多次测量,测量结果的重复性程度或分散程度称为精密度。精密度反映了测量值中的随机误差的大小,随机误差越小,测量值分布越密集,测量的精密度越高。

(2) 正确度。对同一被测量进行多次测量,测量值偏离被测量真值的程度称为正确度。

正确度反映了测量结果中系统误差的大小,系统误差越小,测量的正确度越高。

(3)准确度。精密度与正确度的综合称准确度,它反映了测量结果中系统误差和随机误差的综合数值,即测量结果与真值的一致程度,准确度也称为精确度。

对于同一被测量的多次测量,精密度高的准确度不一定高,正确度高的准确度也不一定高,只有精确度和正确度都高时,准确度才会高。图 1-2 说明了这 3 种情况,图中 μ 代表被测量的真值; \bar{x} 代表多次测量值的平均值;小黑点代表各次测量值; x_k 为应剔除的坏值; t 为测量顺序。

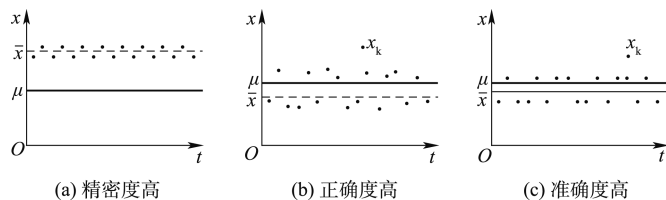


图 1-2 测量值及其误差图

五、热工检测仪表等级的概念

热工检测仪表的准确度等级定义为:准确度等级是指符合计量要求,使其误差保持在规定极限以内的热工检测仪表的等别和级别。

1. 热工检测仪表的级别符号

检测仪表的级别符号一般有以下几种:

- (1)用拉丁文大写字母表示,如 A、B、C;
- (2)用罗马数字表示,如 I、II、III;
- (3)用阿拉伯数字表示,如 1、2、3。

2. 热工检测仪表的等别

等别是指一种档次。凡是按等级划分时,必定有其有关技术规范,例如计量检定规程中,对各等应满足的技术指标有所规定。由于在检定规程中均对各等别的检测仪表检定的条件、误差、程序、数据处理以及各技术要求有了明确的规定,因此要按检定规程所规定的要求进行检定,而检定结果又符合该等别时,即可认为最后给出的实际值符合该等别的总不确定度范围,而不必进行误差分析。另一方面,当检定证书上指明了属于某等别时,只要在有效期限内,也可以明确其实际的总不确定度符合规定要求。

等别与级别在计量学中是两个不同的概念,分别对应于英文中的“order”与“class”,是热工检测仪表的主要性能指标之一。

在热工仪表中,有些检测仪表只按级别划分,如弹簧管式精密压力表,分为:0.25 级、0.4 级与 0.6 级;工作用镍铬-镍硅热电偶,分为 I 级、II 级与 III 级。有些检测仪表只按等别划分,如标准活塞式压力计,分为 1 等、2 等、3 等;标准水银温度计,分为 1 等、2 等;标准铂铑-铂热电偶,分为 I 等、II 等。有些检测仪表既按级又按等别划分,如电测中的标准电池,分为 1 等、2 等;0.0002,0.0005,0.001,0.002,0.005,0.01 及 0.02 级。

等别与级别之间的原则区别在于:级别是根据示值误差确定,表明示值误差的档次;等别是根据总不确定度确定,表明测出的实际值总不确定度的档次。

所谓按等别使用,即按该检测仪表检定证书上给出的实际值使用时,其系统误差为实际值的总不确定度。所谓按级别使用,即按该检测仪表的标称值使用时,其系统误差为该级别的标称值偏离实际值的允许误差。

等别与级别的给出,能反映检测仪表计量性能的总体水平,但不能用它直接表示使用该检测仪表进行检测的准确度。因为检测结果的不确定度中,其不确定分量决不止这二项,而往往还有其他分量与之合成。

第三节 检测装置的组成及类别

热工参数的检测过程中,需要一定的检测设备去实现被测量与单位标准量的比较过程,输入被测量、输出被测量与单位量的比值。检测过程中单独地或连同辅助设备一起用以进行测量的器具被称作检测仪表(仪器)。用于检测热工参数的仪表叫做热工检测仪表,简称热工仪表。

热工仪表是过程检测控制仪表的一大类,又分为温度检测仪表、物位检测仪表、压力检测仪表、流量检测仪表及流程分析仪器等。压力、温度、流量等热工量都是非电量,根据现代化生产发展的需要,这些非电量的检测远远不能满足科研和生产的需要,因为现代化生产要求检测是远距离、快速度,而且能最佳地自动控制生产过程,只有用电量检测法才能满足其需要。热工参数用电测法检测,首先要通过传感器(或检测器),使非电量转换成电量,所以热工检测设备,除非电量检测的仪器仪表外,还包括传感器、变送器和显示仪表等。

一、热工检测装置的组成

无论是简单的热工检测仪表或是较为复杂的热工检测装置,就其部件在处理被检测时的功能而言,都可以看成由传感器、变换器和显示记录部分组成,这些部分之间用信号线路或信号管路联系起来。各环节可以分成许多部件,也可以组成一个整体。

热工检测仪表的基本组成如图 1-3 所示。对于一些简单的热工检测仪表,上述各环节的界限可能不易明确划分,有的简直就是一个整体(如水银温度计);对于一些较为复杂的热工检测装置,往往是通过传感器,把要检测的非电量(压力、温度、流量、液位)转换成电量,再由测量电路处理后输入到显示装置或记录设备中把要检测的热工量显示或记录下来。

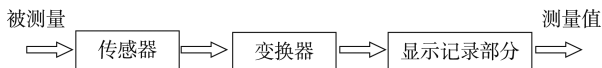


图 1-3 热工检测仪表的基本组成

1. 传感器

传感器是指某种热工量(例如温度、压力、化学量或生物量)按一定的规律和处理方法将其转变为电量的器件或仪器。为实现热工量的电测法,必须先将热工量转变为电量,而这一

转换主要靠传感器来实现。因此,传感器的作用是感受被测量的大小而后输出一个相应的信号,是检测仪表与被检测对象直接发生联系的部分。因为传感器要从被检测对象提取被测量的信息,向后续各个环节提供原始信号,故其能否准确快速地给出信号,在很大程度上决定了整个检测装置的检测质量。

传感器需要达到以下要求:

(1)按被测量的输入量大小,传感器相应发生一个可观察的参数变化作为输出,且此输出与输入之间有稳定的单值函数关系。这种函数关系能按一定的工艺准确复现。

(2)在寻求传感器所依据的物理现象时,总是希望此现象对被测量的反应特别灵敏,对其他参数的作用反应很小,以致可以忽略不计。若不能忽略,则应能对影响采取补偿、修正等措施。

(3)在检测过程中,传感器应尽量减少消耗被测对象的能量,并且对于被测对象的状态没有干扰或干扰极小。

传感器主要由两个基本环节组成,一是敏感元件,二是转换元件。其中敏感元件是一个预变换器。当具体完成非电量到电量的转换时,并非所有的非电量都能利用现有的技术手段直接转换为电量,必须进行预转换,也就是说,将被测的热工量预先转换为另一种易于转换成电量的非电量,然后再转换为电量。

2. 变换器

为了将传感器的输出进行远距离传送、放大、线性化或变成统一信号等,需要用变换器来对传感器的输出做出必要的加工处理。例如压力表中的杠杆齿轮机构就是将弹性元件的大小变形转换成指针在标尺上的转动;电动单元组合仪表的毫伏变送器可将热电偶的热电势转换成4~20mA的电流信号等,所以变换器又称为转换元件。

凡能将一种性质的量变成另一种性质的量的仪表、单元或基元、部件、元件都是变换器。变换器在处理输入信号时,应该使信息损失最小,也就是使误差最小。有时变换器就是传感器,例如压力检测中的位移变换器,在检测距离和位移时就是传感器。

变换器是传感器不可缺少的重要组成部分,它是完成非电量到电量转换的主要装置。

在传感器中有一些比较简单的元件,例如热电偶、热电阻,这类敏感元件输出的就是电量。它同时也兼有转换元件的作用,这类传感器也称为检测元件。

热工检测中常用的变换器及典型应用如表1-1所示。

热工检测常用变换器

表1-1

变换器分类		变换原理	变换器名称	典型应用
电参数式变换器	电阻式	移动电感器触点改变电阻	电感器	压力、位移
		利用电阻的温度物理效应 (电阻温度系数)	热丝计	气流速度、液体流量
			电阻温度计	温度、热辐射
			热敏电阻	温度
		利用电阻的光敏效应	光敏电阻	光强、辐射测温
		利用电阻的温度物理效应	电阻湿度计	湿度

续上表

变换器分类		变换原理	变换器名称	典型应用
电参数式变换器	电容式	改变电容的几何尺寸	电容式压力计	位移、压力
	电感式	改变磁路几何尺寸,导磁体位置来改变变换器电感	电感变换器	位移、压力
		利用压磁物理效应	压磁计	压力
		改变电感	差动变压器	位移、压力
	频率计	利用改变电的或机械的固有参数来改变谐振频率	振弦式压力传感器	压力
			振筒式气压传感器	气压
			石英晶体谐振式传感器	压力
电量变换器	电势	热电效应	热电偶	温度、热流
			热电堆	热辐射测温
		霍尔效应	霍尔变送器	压力、流量
	光电效应	光电池	光强、辐射测温	
电荷	光致电子发射	光发射管	光强、辐射测温	

3. 检测电路

传感器输出的电信号需要经过检测电路进行加工和处理,如衰减、放大、调制和解调、滤波、运算和数字化等。

根据检测任务的难易程度,检测对象的复杂程度,被检测量的种类和数量以及对检测结果提出的要求,有时可采用相当简单的检测电路制成简单的热工检测仪表(如动圈式仪表),有时则要用相当复杂的电路才能制成多种参数、多种功能的检测仪器和设备(如智能数字显示记录仪)。

4. 显示或记录装置

在热工检测中,给出检测结果的是输出显示或记录装置,能显示和记录数据和图形。其作用是向观察者显示被检测的数值和量值。显示可以是瞬时量指示、累积量指示、越限或极限指示(报警值),也可以是相应的记录。有时甚至带调节功能去控制生产过程。所以显示或记录装置也称为二次仪表。

由于检测任务不同,输出电路给出的检测结果形式也不同,难易程度也不一样,最简单的显示方法是用表头指示。为了显示被检测量的变化过程,则常采用示波器、笔录仪、屏幕显示器、打字机和磁带机等输出设备。

由于显示装置是人和仪表(或计算机)联系的主要环节,因此其结构应便于使用者读出数据,并能防止读者的主观误差。数字显示一般就比模拟显示易于减小读数的主观误差。

显示装置现在有模拟式、数字式和屏幕式三种。

1) 模拟式显示

模拟式显示装置最常见的结构是指示器在标尺上移动,连续指示被测量。这种结构操作者一般是按主观方式读数,读数的最低位总是由读者估计。模拟显示设备结构简单,价

格低廉,目前是主要的显示类型设备。记录时则是以曲线形式给出数据。例如动圈指示仪,自动平衡记录仪等都是采用这种显示和记录方式。

2) 数字式显示

数字式显示是直接以数字给出被测量值,这种显示读数清晰、直观,不会有视差。记录时亦可打印出数据。由于这种显示的明显优点,在热工检测中越来越多地被采用。但缺点是这种显示的直观形象性较差。

3) 屏幕显示

屏幕显示是电视技术在热工检测技术中的应用,是目前最为先进的显示方式。既能按模拟式给出曲线,也能给出数字,或两者同时显示。屏幕显示具有形象性和易于读数的优点,并能同时在屏幕上显示大量数据(一种参数或多种参数),有利于比较判断。屏幕显示又称为图像显示或无纸记录。

5. 传输通道

检测仪表(或装置)各环节的输入和输出信号之间的联系是通过传输通道来完成的,传输通道可能是导线、管道、光导管或无线电通信等形式。信号传输通道比较简单,所以往往被人忽视。实际上,不按规定要求布置和选择传输通道,会造成信号失真、信号损失和引入干扰。严重时根本无法进行检测。例如传输电量时,如果导线的阻抗不匹配,可能导致仪表灵敏度降低,电压或电流信号失真,甚至信号送不进仪表内。又如利用热电偶测温时,热电偶与仪表连接的补偿导线分度号不一致,信号接反将导致较大的测量误差。

由热工检测装置的组成结构不难看出,多数都是采用热工量电测法进行检测的。在划分非电量检测仪器结构时,有的技术书籍和文献常把检测仪器的传感器部分称为一次元件(或仪表),而把测量电路和显示或记录部分合成为二次仪表。在这两部分内,传感器占有极重要的地位。当测量环境比较复杂,要求检测的准确度比较高时,特别是有些热工量难以有效地变成电量时,传感器的设计和选用就成为能否完成从非电量到电量转换的关键。

在热工检测中温度、流量、压力、液位等非电量的参数,是通过变换器的转换输出电参数,如电压、电流、电荷、电阻、电容、电感等。这就是热工量的电测法。

热工参数的电测法具有以下优点:

(1)极宽的检测范围,采用电子技术,用放大或衰减的办法很容易改变仪表的灵敏度,使测量仪器具有很宽的幅域。

(2)电子检测仪器具有极小的惯性,因而既能测量缓慢变化的量,也可以检测快速变化的量,热工量的检测采用电子技术将具有很宽的频域。

(3)可实现远距离(或遥感技术)的热工量检测。

(4)利用信号进行各种运算和处理,易于实现多重参数的自动巡回检测和生产的自动控制。若配用微处理机,可实现热工参数的计算机检测、控制和监控管理。

二、热工检测仪表的类别

热工检测仪表是过程检测控制仪表中检测热工参数的一大类,可分类如下:

(1)按热力过程的被检测参数分类:有压力仪表、流量仪表、温度仪表、液位仪表及成分

分析仪器等。

(2)按仪表的显示功能分类:有指示仪表、记录仪表、积算仪表、盲式仪表(无显示、只发信号)和调节仪表等。有的仪表可能同时具有多种显示功能,例如指示记录仪就同时具有显示和记录两种功能。

(3)按仪表各变换环节组成的系统分类:仪表中各变换环节按照不同系统连接(开环还是闭环),使得各组成环节的误差对整个仪表的影响是不同的,从这个角度分类可分为直接变换式仪表和平衡式仪表。

第四节 热工基本测量参数

一、温度与温标

1. 温度的定义

描述物体冷热程度的物理量称为温度。物体越冷,温度越低;反之,物体越热,温度越高。

(1)从宏观角度来看,温度是一个描述热力系统平衡特性的状态参数。热力学第零定律指出:“无论多少个物体互相接触,都能达到热平衡”。该定律表明,达到热平衡的所有物体必定具有一个共同的宏观特性,表征这个宏观特性的物理量就是温度,即一切处于热平衡的物体必然具有相同的温度。

(2)从微观角度来看,温度是物体内部分子、原子等微观粒子不规则热运动强度的量度。微观粒子热运动越剧烈,物体的温度就越高。

2. 温标的规定

温度的数值表示方法称为温度标尺,简称温标,是表示温度高低的尺度。常用的温标有以下三种:

(1)摄氏温标。单位为 $^{\circ}\text{C}$,规定在标准大气压下,纯水的冰点为 0°C ,沸点为 100°C ,其间100等分,每等分为摄氏1度,记作 1°C 。

(2)华氏温标。单位为 $^{\circ}\text{F}$,规定在标准大气压下,纯水的冰点为 32°F ,沸点为 212°F ,其间180等分,每等分为华氏1度,记作 1°F 。

(3)开氏温标。单位为 K ,规定纯水的三相点温度(即固、液、汽三相平衡态的温度)为基本点,定义为 273.16K ,每度的间隔与摄氏温标相同,1度记作 1K 。

摄氏温标和华氏温标的标定都依赖于测温物质的物理特性,温度数值与测温物质有关,称为经验温标;而开氏温标则与测温物质的物理特性无关,是国际上规定的最基本温标,开氏温标又称热力学绝对温标,简称绝对温标。

公制系统采用摄氏温标,英制系统采用华氏温度,而国际单位制系统则采用开氏温标,因此,必须掌握它们之间的换算。

摄氏温度与华氏温度的换算关系为

$$t^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5}t^{\circ}\text{C} + 32 \quad (1-10)$$

摄氏温度与开氏温度的换算关系为

$$TK = t^{\circ}\text{C} + 273.15 \quad (1-11)$$

二、压力及单位

1. 压力的定义

热力系统内单位面积上所受到的工质的垂直作用力称为压力(在物理学中又称压强),用符号 p 表示,即:

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-12)$$

式中: F ——工质对系统内壁的垂直作用力,N;

A ——系统内壁受力面积, m^2 。

从分子运动论观点来看,气体压力是大量气体分子无规则热运动对容器壁面的平均撞击力,数值与单位体积内的分子数和分子的平均移动动能成正比。液体系统除传递压力外,在重力场中还有由于液体的重量而产生静压力,静压力与液柱垂直高度有关。平衡态时热力系统中各处压力均匀一致。

2. 压力的单位

根据力 F 和面积 A 选用单位的不同,压力的单位可分三类:

(1)国际制单位:帕斯卡(Pa), $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$ 。工程上 Pa 太小而常用巴(bar)和 MPa, $1\text{bar} = 10^5\text{Pa}$, $1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}$ 。

(2)英制单位:磅/平方英寸(1bs/in²)或英寸水银柱(inHg)。

(3)公制单位:工程大气压(at)、毫米水银柱(mmHg)、米水柱(mH₂O)、标准大气压(atm)。

各种压力单位的换算关系如表 1-2 所示。

各种压力单位的换算关系

表 1-2

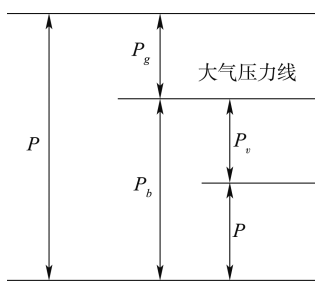
压力单位	Pa	kgf/cm ²	mmH ₂ O	mmHg	mbar	atm
1Pa	1	1.02×10^{-5}	0.102	7.501×10^{-3}	10^{-2}	9.87×10^{-6}
1kgf/cm ²	9.806×10^4	1	10^4	735.56	980.6	0.9678
1mmH ₂ O	9.806	10^{-4}	1	7.3556×10^{-2}	9.806×10^{-2}	0.9678×10^{-4}
1mmHg	133.3	13.6×10^{-4}	13.6	1	1.333	1.316×10^{-3}
1mbar	100	0.102×10^{-2}	10.2	0.7501	1	9.87×10^{-4}
1atm	10.13×10^4	1.033	1.033×10^4	760	1013	1

3. 大气压力(P_b)

大气压力是由地面上几百公里厚的空气层的重量所造成的,大小随纬度、高度和气候等条件而有些变化,可用气压表测定。通常所说的大气压均指当地大气压。在物理学中,把纬度 45°海平面上常年平均气压定义为标准大气压(atm)。

4. 表压力、真空度及绝对压力

工质的压力可用压力表测定,由于工程上测压仪表本身常处于大气压力作用下,因此表

图1-4 P 、 P_g 、 P_v 、 P_b 之间的关系示意图

上所指示的压力并非被测系统的真实压力,而是系统压力与当地大气压力的某种差值。绝对压力就是指系统的真实压力,用符号 P 表示;表压力是指系统压力高于大气压力时,压力表的读数,用符号 P_g 表示;真空度则是指系统压力低于大气压力时,压力表的读数,用符号 P_v 表示。上述各压力之间的关系示意图如图 1-4 所示。

需要指出的是,只有绝对压力 P 才是状态参数。在计算高压容器的绝对压力时,可将大气压力视为常数,近似取作 P_b 等于 0.1MPa 或 1atm 。但当被测系统压力较小,其数值与大气压力相近时,则不能将大气压力视为常数,而应利用气压计测定其具体数值。

三、物位及单位

1. 物位的定义

通过物位测量可以确定容器中被测介质的储存量,以保证生产过程物料平衡,可为经济核算提供可靠依据。物位测量的特点是敏感元件接收到的信号一般与被测介质的某一特性参数有关,例如静压式和浮力式液位计与介质的密度有关;电容式物位计与介质的介电常数有关;超声波物位计与声波在介质中的传播速度有关;而射线式物位计与介质对射线的线性吸收系数有关。当被测介质的温度、组分等改变时,这些参数可能也要变化,从而影响测量精度等。

2. 物位测量原理

在物位测量中,尽管各种测量方法所用的技术各不相同,但可将其归纳为以下几种测量原理:

1) 基于力学原理

敏感元件所受到的力(压力)的大小与物位成正比,包括静压式、浮力式和重锤式物位测量等。

2) 基于相对变化原理

当物位变化时,物位与容器底部或顶部的距离发生改变,通过测量距离的相对变化可获得物位的信息。这种测量原理包括声学法、微波法和光学法等。

3) 基于某强度性物理量随物位的升高而增加原理

例如对射线的吸收强度,电容器的电容量等。

3. 物位测量方法

目前,常用的物位测量方法可分为下列几种:

1) 静压式物位测量

根据流体静力学原理检测物位。静止介质内某一点的静压力与介质上方自由空间压力之差,与该点上方的介质高度成正比,因此可利用差压来检测液位。这种方法一般只用在液位的检测。主要采用玻璃管及压力(压差)仪表来测量。

2) 浮力式物位测量

利用漂浮于液面上浮子随液面变化的位置,或者部分浸没于液体中的物质的浮力随液

位变化来检测液位。前者称为恒浮力法,后者称变浮力法,二者均用于液位的测量。恒浮力式物位测量包括浮标式、浮球式和翻板式等各种方法。变浮力式物位测量方法中典型的敏感元件是浮筒,是利用浮筒由于液体浸没高度不同以致所受的浮力不同来检测液位的变化。

3) 电气式物位测量

将敏感元件做成一定形状的电极置于被测介质中,根据电极之间的电气参数(如电阻、电容等)随物位变化的改变来对物位进行检测。这种方法既可用于液位检测,也可用于料位检测。

4) 声学式物位测量

利用超声波在介质中的传播速度及在不同相界面之间的反射特性来测量物位。液位和料位的测量都可以用此方法。

5) 射线式物位测量

放射性同位素所放出的射线(如 β 射线、 γ 射线等)穿过被测介质(液体或固体颗粒)因被其吸收而减弱,吸收程度与物位有关。由于射线的可穿透性,它们常被用于情况特殊或环境恶劣的场合实现各种参数的非接触式测量,如位移、材料的厚度及成分、流体密度、流量、物位等。利用这种方法可实现物位的非接触式测量。

除此之外还有微波法、光学法、重锤法等。

4. 物位的单位

物位测量的单位,一般用长度单位如 m、cm、mm 等表示。

四、流量及单位

1. 流量的定义

单位时间内流过某一截面积的流体数量称为瞬时流量,简称流量。在某一段时间内所流过的流体体积的总和称为累积流量或流体总量。

流量有两种表示方法,一种是体积流量,一种是质量流量。一般情况下,对不可压缩流体来讲,用体积流量的时候比较多;而对于可压缩流体,则以质量流量作为最终使用的参数。

2. 流量的单位

(1) 体积流量 Q :

指单位时间内流过某一截面积的流体体积,单位是 m^3/h 或 m^3/s ,有时也用到 L/min 或 L/h 。

$$Q = A \cdot v \quad (1-13)$$

式中: A ——流体流过的横截面积, m^2 ;

v ——流体流过该截面的平均流速, m/s 。

(2) 质量流量 G :

指单位时间内流过某一截面积的流体质量,单位是 kg/h 或 kg/s ,有时也用到 t/h 或 kg/min 。

$$G = A \cdot v \cdot \rho \quad (1-14)$$

式中: ρ ——流体的密度, kg/m^3 。

体积流量与质量流量的关系为:

$$G = Q \cdot \rho \quad (1-15)$$

第二章

温湿度检测仪表

各种测温方法是基于物体的某些物理化学性质与温度之间的一定关系,例如物体的几何尺寸、颜色、电导率、热电动势和辐射强度等都与物体的温度有关。当温度不同时,以上这些参数中的一个或几个随之发生变化,测出这些参数的变化,就可间接地知道被测物体的温度。温度测量方法分为接触法和非接触法两类,如图 2-1 所示。

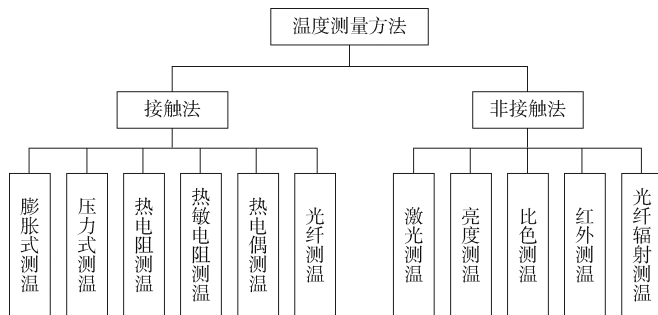


图 2-1 温度测量方法

温度计的具体分类如表 2-1 所示。

温度计分类表

表 2-1

序号	温度计分类		温度计工作原理
1	膨胀式温度计	液体膨胀式	液体或固体受热膨胀
		固体膨胀式	
2	压力式温度计	液体式	封闭在固定容积中的液体、气体或某种液体的饱和蒸汽受热体积膨胀或压力变化
		气体式	
		蒸汽式	
3	电阻温度计		导体或半导体受热电阻变化
4	热电偶温度计		热电偶的热电动势与温度有关
5	辐射式温度计	光学式	物体热辐射与温度有关
		辐射式	
		比色式	
6	气体温度计		利用理想气体 $pV=f(t)$ 的关系
7	声学温度计		气体中声波的传播速度与温度有关
8	噪声温度计		电阻体中噪声电压平方与温度成正比
9	磁温度计		顺磁性材料磁化率随温度变化

第一节 膨胀式温度计

膨胀式温度计是利用膨胀法来检测温度的一种仪表。所谓膨胀法就是利用物质的热膨胀性质与温度的固有关系为基础实现的一类测温方法。基于此法做成的仪表称为膨胀式温度计。膨胀式温度计按选用的物质不同可分为液体、气体和固体三种膨胀式温度计。液体膨胀式温度计又叫玻璃液体温度计。根据填充的工作液不同又可分为水银和酒精温度计两类。固体膨胀式温度计按结构的不同又可分为双金属温度计和杆式温度计两种。

膨胀式温度计的测量范围一般在 $-200 \sim 500^{\circ}\text{C}$ 。在热工检测中常用来检测槽液(如碱槽、油槽、法兰槽、淬火槽)的温度及低温干燥箱的温度;也可检测设备、管道及容器中介质的温度。另外它还具有结构简单、制造容易、使用方便、价格便宜以及精度高等特点。但它还存在不便于远距离测温(压力式温度计除外)、结构脆弱、易损坏等缺点。

一、玻璃液体温度计

玻璃液体温度计是一种膨胀式温度计,其测温原理是基于物质的热膨胀特性。

当温度计插入温度高于温度计初始温度的被测介质后,感温液受热膨胀,使感温液柱在玻璃毛细管内上升。另一方面,感温泡也因受热膨胀而容积增大,使感温液柱下降。由于感温液的膨胀系数远大于玻璃的膨胀系数,其结果使感温液柱上升了一段距离。感温液与玻璃的体积膨胀之差称为视膨胀系数,因此也可以说玻璃温度计测温的基本原理是基于感温液对玻璃的视膨胀。

设 0°C 时温度计填充液体的体积为 V_0 、 $t^{\circ}\text{C}$ 时为 V_t ,液体与玻璃的相对膨胀系数为 β ,当忽略玻璃体积变化时,则有:

$$V_t = V_0 + V_0 \beta t \quad (2-1)$$

因温度升高,填充液体膨胀而增加的体积为:

$$V'_t = V_t - V_0 = V_0 \beta t \quad (2-2)$$

此体积在毛细管内形成液体柱,其升降显示出 V'_t 的变化,如将此液体柱的变化长度按标标进行分度,就构成了一支温度计。

玻璃液体温度计一般是由装有感温液的感温泡、玻璃毛细管和刻度标尺等三部分组成。感温泡或直接由玻璃毛细管加工制成(称拉泡),或由焊接一段薄壁玻璃制成(称接泡)。玻璃毛细管上有安全泡,有的玻璃温度计还有中间泡。

玻璃液体温度计可分为标准温度计、实验室用温度计和工作用温度计。工作用温度计又分为通用温度计和专业用温度计两种。

玻璃液体温度计按结构的型式分有棒式、内标尺式和外标尺式三种。其外形有直形、 90° 角形和 135° 角形。内标式玻璃液体温度计如图 2-2(a) 所示,刻度标尺刻在白瓷板上。标尺板与玻璃毛细管是分开的,并衬托在毛细管背面,与毛细管一起封装在玻璃外套管内。二等标准水银温度计和实验用、工业用玻璃温度计多采用此种结构。

图 2-2(b)为棒式温度计。它的温度标尺直接刻在玻璃毛细管表面;玻璃毛细管又分透明棒式和熔有釉带棒式两种。一等标准水银温度计是透明棒式的,读取示值时,可以正反两面读数,一些精密实验用玻璃液体温度计也有透明棒式的。二等标准水银温度计是在其玻璃毛细管上刻度标尺的背面熔入一条乳白色釉带制成,其他工作用玻璃液体温度计有的是熔入白色釉带,有的是熔入彩色釉带,以便读数直观、刻度清晰。

外标式玻璃液体温度计的刻度标尺板和玻璃毛细管是分开的。但两者只用金属薄片钮带固定。这种结构的玻璃液体温度计有测量室温用的寒暑表和气象测量用的最高、最低温度计等,如图 2-2(c)所示。

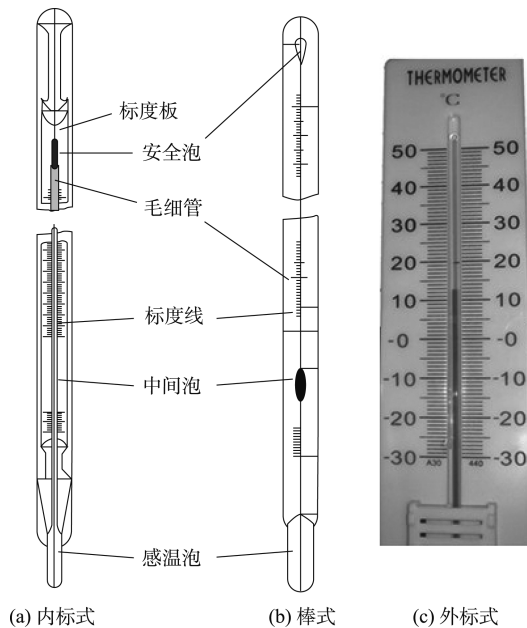


图 2-2 玻璃管式温度计的三种类型

上述三种结构的温度计各有其优缺点。棒式温度计由于标尺直接刻在玻璃毛细管上,避免了可能因标尺板与玻璃毛细管固定结构松动而带来的误差,读取的示值准确可靠。透明棒式温度计可从正、反两面读,从而消除了读取示值时因人的视线与温度计不垂直而引起的读数误差。棒式温度计的缺点是标尺刻线不如内标式的清晰,且测量时标尺刻线浸没在被测介质中,刻线上涂的颜色易脱落,读取示值不如内标式温度计方便,甚至可能发生读数差错。透明棒式温度计刻线后面无衬托,读取示值更为困难。内标式温度计标尺刻线醒目,易于读取示值,但标尺板与玻璃毛细管固定结构松动后会造成横向、纵向位移,带来检测误差。

外标式温度计由于玻璃毛细管与标尺板只用钮带固定在一起,因相互之间容易发生位移而带来测量误差,一般只用于检测准确度要求不高的场合。热工检测用的玻璃液体温度计多数是棒式和内标式玻璃液体温度计。

玻璃液体温度计按用途又可分为电接点式玻璃液体温度计、标准用玻璃液体温度计、工业用玻璃液体温度计、贝克曼温度计等。

电接点式玻璃液体温度计不但可以用来检测温度,而且当它和继电器配合后还可以用来调节和控制温度以及发送温度报警信号。

电接点式玻璃液体温度计在热工参数检测与控制中用得较为广泛,它实际上是一支普通的内标尺式温度计,它有两条金属丝,一条焊在感温泡内,另一条在一套磁力装置的推动下,可停留在与被控制温度相应的温度线上。两金属丝又通过铜线引出连接到信号器或中间继电器上。当温度上升到规定温度时,两金属丝通过水银柱形成闭合回路,此时继电器工作。温度计有两个标尺,上标尺用来调整温度给定值,下标尺用来读数,其实物如图 2-3 所示。

标准用玻璃液体温度计是指标准水银温度计,它是用来校准被检温度计的精密水银温度计,所以它是作为量值传递用的标准器具。标准水银温度计都是成套生产的,每套分若干支,每一支温度计间隔都很小,并有零位标记。从 0℃ 到主标尺间的毛细管有一段胀大部分,可以容纳相当于由 0℃ 加热到主标尺最低温度时所膨胀的体积。这样既可以提高测量精度,又可以缩短标尺长度,温度计的上端毛细管也有一胀大部分,当温度超过刻度上限时,可以保护温度计免受损坏。

我国根据生产和科研的实际需要,对标准水银温度计规定了不同等级,用来进行量值传递。其等级分为:一等标准水银温度计和二等标准水银温度计。其测量范围为 -30 ~ 300℃。一等标准水银温度计又分为 9 支组(0 ~ 100℃ 最小分度值为 0.05℃,其余范围为 0.1℃)

和 13 支组(最小分度值均为 0.05℃)两种。二等标准水银温度计为 7 支组,最小分度值为 0.1℃。

工业用玻璃液体温度计按填充物不同分有水银温度计和有机液体温度计。有机液体有酒精、甲苯、煤油和戊烷等,所以可分为酒精温度计、甲苯温度计、煤油温度计和戊烷温度计。热工检测用的温度计多数是水银温度计和酒精温度计。

工业用水银温度计利用水银作为填充物质。水银的体积膨胀系数虽然不很大,但因它具有不粘玻璃、不易氧化、传热快和纯度高等优点,并且在标准大气压下,水银在 -38.87℃ 到 +356.58℃ 温度范围内为液态,在 200℃ 以下几乎和温度成线性关系,所以,水银温度计能做到刻度均匀、能测量 -30 ~ 300℃ 的温度。当在毛细管中充以化学性质不活泼的高压惰性气体时,可以用来测量 -30 ~ 500℃ 的温度。在特殊情况下可以测量 750℃ 或更高的温度。

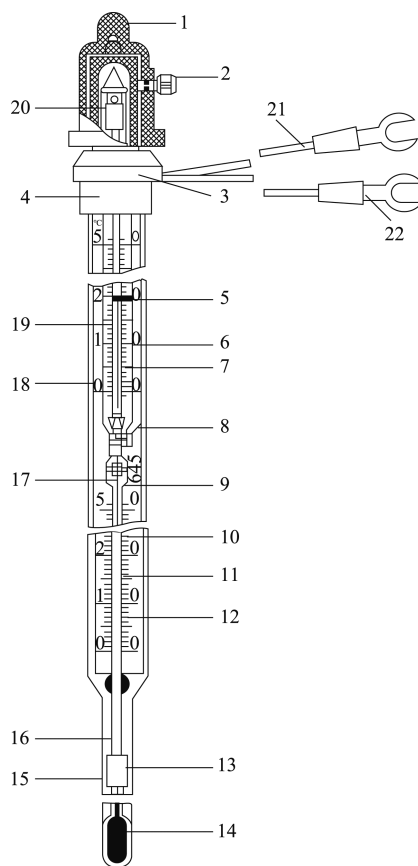


图 2-3 电接点式玻璃液体温度计

- 1-调节磁钢;2-磁钢固定螺钉;3-盖;4-接线底座;5-指示螺母;6-设定标度;7-调节螺杆;8-接点引出线;9-钨丝;10-指示标度;11-测量毛细管;12-标度板;13-毛细管固定塞;14-感温泡;15-下体套管;16-毛细管;17-安全泡;18-上体套管;19-扁管;20-扁铁;21-信号线;22-接线端子

在热工检测中,水银温度计大多用于检测液体、气体和粉状固体的温度。

有机液体玻璃温度计在热工检测中主要用来检测低温,这是因为有机液体玻璃温度计的填充液体是膨胀系数大、凝固点低的酒精、甲苯和戊烷等,最低可测量 -200°C 的温度。但由于有机液体容易黏附玻璃,毛细现象严重,因而毛细管不能做得很细,使得它的灵敏度不高、刻度不均匀,所以检测精度低。此外,有机液体还有比热大、传热慢等问题。虽然如此,但它在低温范围内仍然得到了广泛的应用。

贝克曼温度计在热工检测中专门用于检测精密温差,所以也称为差示温度计。它的示值刻度范围为 $0\sim 5^{\circ}\text{C}$ 或 $0\sim 6^{\circ}\text{C}$,最小分度值是 0.01°C ,用读数望远镜读取示值可估计到 0.001°C 。由于测量起始温度可以调节,所以可以在 $-20\sim 125^{\circ}\text{C}$ 范围内使用。如起始温度调至 20°C 时,可检测 $20\sim 25^{\circ}\text{C}$ 范围的温差;调至 30°C 时,可检测 $30\sim 35^{\circ}\text{C}$ 范围的温差。

二、压力式温度计

压力式温度计是属于气体膨胀式温度计,它是利用密闭容积内工作介质的压力随温度变化的性质来测量温度的一种机械式测温仪表。它具有结构简单,价格便宜,可实现就地指示或远距离测量,仪表刻度清晰,对使用环境条件要求不高,以及维修工作量少等特点。但它的时间常数较大,准确度不是很高。

压力式温度计适用于对温泡材料无腐蚀作用的液体、气体和蒸气的温度检测,能自动记录,信号远传,以及报警、控制和自动调节。可广泛用于工业、农业、国防和科研单位在热工检测中进行温度检测。

1. 压力式温度计的工作原理及类别

压力式温度计是依据系统内部工作物质的体积或压力随温度变化的原理工作的。如图2-4所示。仪表封闭系统由温泡、毛细管和弹性元件组成,内充工作物质。在检测温度时,将温泡插入被测介质中,受介质温度影响,温泡内部工作物质的体积(或压力)发生变化,经毛细管将此变化传递给弹性元件(如弹簧管),弹性元件变形,自由端产生位移,借助于传动机构,带动指针在刻度盘上指示出温度数值。

压力式温度计有指示式、记录式、报警式和调节式等数种类型。

压力式温度计按填充物质不同可分为液体(一般是水银、二甲苯、甲醇、甘油)压力式温度计、气体(惰性气体—氮气)压力式温度计和蒸气(低沸点液体饱和蒸气,如氯甲烷、氯乙烷、丙酮和甲苯等)压力式温度计。

2. 压力式温度计的结构

无论哪一类压力式温度计都是由温包、毛细管和弹簧压力计(表壳、指针、刻度盘、弹簧管、传动机构)三个基本部分组成。如图2-5所示。测温时将温包插入被测介质中,它感受温度后,按一定规律将温度变化成温包内工作介质的压力变化,此压力经毛细管传给弹簧压力计,压力计则以温度刻度指示出被测温度值。从此结构可以看出,弹簧压力计作为指示仪表,毛细管为连接导管,而温包则为感温元件,它是将温度转换成压力的传感器。

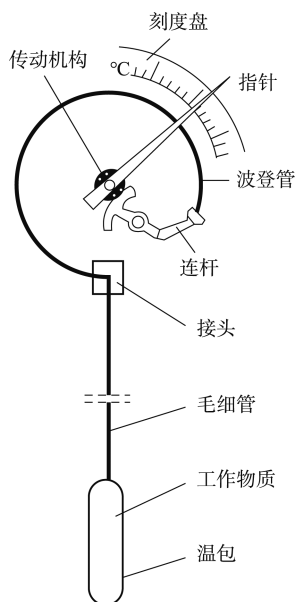


图 2-4 压力式温度计的原理图

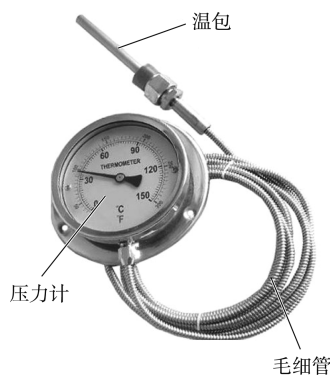


图 2-5 压力式温度计的实物图

因压力式温度计的温包是直接感受温度的敏感元件,所以它直接关系到仪表的灵敏度。为此,对它的要求是热惰性小并能抵抗被测介质的侵蚀。为了减小温包的热惰性,应尽量增大温包表面积与自身容积比;在满足强度要求的情况下,尽量减少厚度,以减轻重量,增强导热能力。此外温包材料应有尽可能大的导热系数。

温包及套管材料多用黄铜或钢,对于腐蚀性介质可用不锈钢。水银压力式温度计则必须采用不锈钢。对于气体压力式温度计,温包常用无缝钢管或不锈钢管做成,外径为 $12 \sim 22\text{mm}$,长为 $65 \sim 435\text{mm}$ 。管的一端要用塞头堵死,另一端焊一根直径为 6mm 的引长管,以便于连接毛细管及调节温包插入介质的深度。测温时,温包借管螺纹固定在设备上。

压力式温度计的毛细管是将温包内部工作介质体积或压力变化传给弹性元件的中间导管,起延伸测温点到表头(显示环节)距离的作用。它的直径越小,长度越大,传递压力的滞后现象就越严重,这样对测量不利。反之,如毛细管的直径越大,长度越小,能够测量的最大距离也就越小,这样对测量也不利。为此,考虑以上矛盾因素,工业上一般采用的毛细管内径为 $0.15 \sim 0.5\text{mm}$,长度为 $20 \sim 60\text{m}$ 。

毛细管是用铜或钢冷拉成的无缝管。为了防止碰伤,外面套上金属蛇形管。

弹性元件是将工作物质体积或压力变化转变成位移的核心元件。压力式温度计的弹性元件主要是采用弹簧管,其次是波纹管 and 膜盒。

压力式温度计的传动机构是将弹性元件自由端的位移加以变换或放大,以带动显示环节或控制机构。它包括一级曲柄连接机构和一级齿轮传动机构,其作用是把弹性元件自由端直线位移转变成指针的转角。这种连杆齿轮机构具有结构简单、传动比大、工作可靠及调整方便等特点。指示型压力式温度计几乎都是采用这种机构。