

全国高职高专教育土建类专业教学指导委员会规划推荐教材

Kongtiao Xitong
Tiaoshi Yu
Yunxing

空调系统调试与运行

(第二版)

(供热通风与空调工程技术专业适用)

本教材编审委员会组织编写

刘成毅 毛 辉 编著

中国建筑工业出版社

全国高职高专教育土建类专业教学指导委员会规划推荐教材

空调系统调试与运行（第二版）

（供热通风与空调工程技术专业适用）

本教材编审委员会组织编写

刘成毅 毛 辉 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

空调系统调试与运行/刘成毅等编著. —2版. —北京: 中国建筑工业出版社, 2015. 12
全国高职高专教育土建类专业教学指导委员会规划推荐教材
(供热通风与空调工程技术专业适用)
ISBN 978-7-112-18766-9

I. ①空… II. ①刘… III. ①空气调节系统-高等职业教育-教材 IV. ①TU831.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 279261 号

本书比较详细、完整地介绍了空调系统安装完毕后的试运行调试程序和方法, 同时也介绍了空调系统运行中的日常管理、保养和维修知识。全书共 6 章, 主要包括: 空调测试仪表与使用方法、空调系统试运行与调试的准备工作、空调电气与自动控制系统调试、空调水系统及制冷系统试运行与调试、空调系统试运行与调试、空调系统运行与维护。

本书融入了近年来国内出现的空调系统新检测调试技术, 在内容和编排上与空调工程相关标准密切联系, 与工程实际有较好的结合。除作为教材外, 还可供从事空调工程安装和运行管理的技术人员参考。

课件网络下载方法: 请进入 <http://www.cabp.com.cn> 网页, 输入本书书名查询, 点击“配套资源”进行下载; 或发邮件至 524633479@qq.com 索取课件。

* * *

责任编辑: 张健 朱首明 齐庆梅 李慧
责任校对: 李欣慰 刘梦然

全国高职高专教育土建类专业教学指导委员会规划推荐教材

空调系统调试与运行

(第二版)

(供热通风与空调工程技术专业适用)

本教材编审委员会组织编写

刘成毅 毛辉 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

廊坊市海涛印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 11½ 字数: 277 千字

2016 年 3 月第二版 2016 年 3 月第七次印刷

定价: 23.00 元 (附网络下载)

ISBN 978-7-112-18766-9

(28043)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

供热通风与空调工程技术专业教材

编审委员会名单

主 任：符里刚

副主任：吴光林 高文安 谢社初

委 员：汤万龙 高绍远 王青山 孙 毅 孙景芝

吴晓辉 余增元 杨 婉 沈瑞珠 黄 河

黄奕沅 颜凌云 白 桦 余 宁 谢 兵

蒋志良 赵瑞军 苏长满 苏德全 吴耀伟

王 丽 孙 岩 高喜玲 刘成毅 马志彪

高会艳 李绍军 岳亭龙 商利斌 于 英

杜 渐 张 炯

序 言

近年来,建筑设备类专业分委员会在住房和城乡建设部人事司和全国高职高专教育土建类专业教学指导委员会的正确领导下,编制完成了高职高专教育建筑设备类专业目录、专业简介。制定了“建筑设备工程技术”、“供热通风与空调工程技术”、“建筑电气工程技术”、“楼宇智能化工程技术”、“工业设备安装工程技术”、“消防工程技术”等专业的教学基本要求和校内实训及校内实训基地建设导则。构建了新的课程体系。2012年启动了第二轮“楼宇智能化工程技术”专业的教材编写工作,并于2014年底全部完成了8门专业规划教材的编写工作。

建筑设备类专业分委员会在2014年年会上决定,按照新出版的供热通风与空调工程技术专业教学基本要求,启动专业规划教材的修编工作。本次规划修编的教材覆盖了本专业所有的专业课程,以教学基本要求为主线,与校内实训及校内实训基地建设导则相衔接,突出了工程技术的特点,强调了系统性和整体性;贯彻以素质为基础,以能力为本位,以实用为主导的指导思想;汲取了国内外最新技术和研究成果,反映了我国最新技术标准和行业规范,充分体现其先进性、创新性、适用性。本套教材的使用将进一步推动供热通风与空调工程技术专业的建设与发展。

本次规划教材的修编聘请全国高职高专院校多年从事供热通风与空调工程技术专业教学、科研、设计的专家担任主编和主审,同时吸收具有丰富实践经验的工程技术人员和青年教师参加。该规划教材的出版凝聚了全国高职高专院校供热通风与空调工程技术专业同行的心血,也是他们多年来教学工作的结晶和精诚协作的体现。

主编和主审在教材编写过程中一丝不苟、认真负责,值此教材出版之际,谨向他们致以崇高的敬意。衷心希望供热通风与空调工程技术专业教材的面世,能够受到高职高专院校和从事本专业工程技术人员的欢迎,能够对土建类高职高专教育的改革和发展起到积极的推动作用。

全国高职高专教育土建类专业教学指导委员会
建筑设备类专业分委员会

2015年6月

第二版前言

本书是普通高等教育土建学科专业“十一五”规划教材；全国高职高专教育土建类专业教学指导委员会规划推荐教材，是根据高等学校土建学科教学指导委员会高等职业教育专业委员会提出的《建设类高等职业教育专业教材编审原则意见》，以及教育部组织制定的《高职高专教育基础课程教学基本要求》、《高职高专教育专业人才培养目标及规格》、《高等职业教育供热通风与空调工程专业教学基本要求》，由全国高职高专教育土建类专业教学指导委员会组织编写。

自2005年第一版出版至今已10年，经过多次重印。10年以来，社会发展对空调环保和节能提出了更高的要求，这些要求已逐步在工程设计、设备制造和施工工艺中得以体现。为了适应空调技术的发展，本书以第一版为蓝本，结合高等职业教育特点和教学改革基本要求，在保留第一版体系的基础上，对书中内容作了较大幅度的修订，主要具有以下特点：

1. 内容与本系列“供热通风与空调工程技术”专业教材相关内容等相互衔接。通过空调系统调试与试运行工艺主线联系各课程主要知识点，使整个专业课程体系更加缜密与充实。

2. 注重介绍国家、行业有关空调工程技术规程和验收标准的应用和执行。通过阐述工艺方法提供大量相关规程和标准的信息，有利于培养学生查阅和应用相关规程、标准的能力。

3. 书中所阐述空调系统调试与试运行工艺方法在总结成熟技术的基础上，注意吸收已知且可靠的先进技术，兼收并蓄，遴选优化。工艺方法实用和具有可操作性。既便于学生学习，也便于现场施工人员理解和实施。

4. 本书全面纠正了第一版存在的错误和表达不妥之处，增加了包括氨制冷系统在内的制冷管道系统气密性试验最新理论和工艺方法，以及地源热泵技术、模块式机组和节能维护保养技术等内容。

5. 本书从机组的启动、运行调节、常见故障及处理方法等方面系统地介绍空调系统在投入使用后的运行管理与维护。

参加本书第二版编写修订的有：四川建筑职业技术学院刘成毅（教学单元1、2、5），刘成毅、刘昌明（教学单元3），毛辉（教学单元4、6），全书由刘成毅、毛辉合作编著。

本书第二版编写过程中参阅了大量的文献资料，使本书内容丰富充实，在此一并向诸位原作者致以衷心感谢。

限于编者学术水平和实际经验，书中难免有不妥之处，竭诚希望读者批评指正。

第一版前言

本书是全国高职高专教育土建类专业教学指导委员会规划推荐教材。全书共分六章,内容包括大、中型空调系统安装试运行调试和工作运行的日常管理与维修保养两部分。高等职业教育“供热通风与空调工程技术”专业主要培养在施工现场第一线从事安装与调试工作的应用型技术人才,因此本书着重介绍空调系统安装完毕后的试运行调试从准备工作到竣工验收的实施程序和工艺方法。同时第六章也较详细地介绍了空调系统工作运行的日常管理、操作和维修保养基本知识。在内容的安排上注意了这两部分各自的系统性和完整性,又避免了重复且可以相互借鉴。

根据高职教育应突出“实用”的特点,我们在内容的选用和编排上做了一些新的尝试。首先是教材内容与空调工程实际紧密结合,将大量来源于现场第一线的技术和管理信息融入教材。同时我们希望做到:教材各章、节、段的内容编排顺序尽量与工程实际的实施过程一致,各章节的知识点与工程中的技术点一一对应,使知识结构能够比较完整、实用,以适应用人单位对学生毕业即能上岗的要求。但因时间很仓促,有一些设想和内容来不及准备和完善,未能在本书中体现,对此感到遗憾,待以后进一步补充提高。因编者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,敬请批评指正。

安排本课程教学应注意与其他课程在时间上的先后关系。本课程要求学生已具备空调、制冷和测控技术等方面的知识。由于教学内容有很强的实践性和技术性,课堂教学后应结合现场实习,让学生将所学知识得以巩固和充实。

本书由刘成毅主编并统稿,副主编为苏德全、毛辉。具体分工是:刘成毅(绪论、第1章第1、5节,第2章第1、2、3节、第5章),商利斌(第1章第2、3、4、6、8节),毛辉(第1章第7节,第2章第4节,第4章第1、5节,第6章第1节),刘昌明(第3章第2、3、4节),苏德全(第3章第1节,第4章第2、3、4节),胡亮(第6章第2节),第6章第3节由毛辉与胡亮合编。山东建筑工程学院张金和教授审校了全书,为本书的编写提出了许多宝贵的意见和建议,内蒙古建筑职业技术学院贺俊杰教授审阅了全部书稿,也提出了许多宝贵的建议,编者向他们表示衷心的感谢。在此也向本书参考文献的作者表示感谢。

目 录

绪论	1
0.1 空调运行与调试的任务	1
0.2 空调系统运行管理的意义与现状	3
教学单元 1 空调测试仪表与使用方法	4
1.1 测量仪表的基本特性	4
1.2 温度测量	8
1.3 湿度测量	11
1.4 压力测量	14
1.5 流速与流量测量	16
1.6 噪声测量	19
1.7 高效过滤器检漏仪器及其方法	21
单元小结	24
思考题与习题	24
教学单元 2 空调系统试运行与调试的准备工作	25
2.1 空调系统试运行与调试执行标准与规范	25
2.2 施工准备	29
2.3 空调系统试运行调试方案的编制	31
2.4 空调系统试运行调试方案示例	35
单元小结	40
思考题与习题	40
教学单元 3 空调电气与自动控制系统调试	41
3.1 空调自动控制与调节系统基本知识	41
3.2 空调自动控制与调节系统图例简介	42
3.3 空调电气与自动控制系统通电前的检查测试	50
3.4 空调电气与自动控制系统通电检查与调试	53
单元小结	58
思考题与习题	58
教学单元 4 空调水系统及制冷系统试运行与调试	59
4.1 冷却水系统与冷冻水系统试运行与调试	59
4.2 制冷管道系统吹扫与气密性试验	64
4.3 活塞式制冷机组试运行与调试	71
4.4 螺杆式制冷机组试运行与调试	77
4.5 离心式制冷机组试运行与调试	81

4.6 溴化锂吸收式制冷机组的试运行与调试·····	85
4.7 地源热泵机组的试运行与调试·····	93
4.8 模块式制冷机组的调试与试运行·····	98
单元小结·····	99
思考题与习题·····	99
教学单元5 空调系统试运行与调试 ·····	100
5.1 空调风系统设备单机试运行与调试·····	100
5.2 空调风系统风量测定与调整·····	109
5.3 空调系统无负荷联合试运行与调试·····	117
5.4 竣工验收与空调系统综合效能测定·····	122
单元小结·····	130
思考题与习题·····	131
教学单元6 空调系统运行与维护 ·····	132
6.1 空调运行管理的意义·····	132
6.2 空调系统运行与管理·····	133
6.3 空调系统日常维护与故障分析·····	167
单元小结·····	172
思考题与习题·····	173
主要参考文献 ·····	174

绪 论

0.1 空调试运行与调试的任务

从世界上第一台具有制冷能力的空调在 20 世纪初诞生以来,空调的发展已有近 100 年的历史,我国最早使用集中空调系统的记录是 20 世纪 30 年代的上海大光明电影院。20 世纪 50 年代至 80 年代,空调在我国主要用于国防、科研和少数工业生产部门。改革开放以来,随着国民经济的飞速发展,空调技术已得到了非常广泛的应用。目前,在影剧院、大型商场、体育馆、高档宾馆和办公楼,以及各种娱乐场所安装空调已经非常普遍,家用空调也正在普及。特别是最近 10 年通过与国外技术的交流和引进,我国空调制造业有了长足的发展,已具备非常强大的研发和生产实力,产品种类和规格与国际同步,许多产品已达到世界先进水平并销往国外。进入 21 世纪以后,根据人们对社会发展和环境保护的新认识,健康、环保、节能等要求已逐步在设备制造和工程设计中得以体现,空气调节技术正处于一个新的发展时期。

空调系统的运行质量首先取决于设计、制造和安装三个方面。先进的设计方案和优良的产品质量是保证空调系统良好工作性能的基础,但系统的最终质量还要靠安装来实现。特别是大中型空调工程,需要把由不同厂家生产的各种类型规格的材料、半成品、成品、部件、设备,通过在现场安装形成完整的系统,并使其稳定、可靠的运行,从而为用户提供符合设计要求的人工环境,这是一个相当复杂的工艺过程。大中型空调安装工程在技术方面涉及机械、电子、制冷、控制等多个专业领域,在施工中要执行和应用多种标准、规范和技术文件,而且工期会长达数月甚至数十个月,这要求施工单位在安装全过程中实行严格的质量控制。

根据《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300—2013,见表 0-1,大中型空调工程含有三个子分部工程,分别对应空调风系统、制冷系统和冷热媒系统三个子系统。出于节能的目的,在空调风系统和冷热媒系统中还可以设置空气热交换装置和换热管网。实际上,完整意义的空调系统安装还包括电气系统和自动控制与调节系统。前者属于建筑电气分部工程,后者属于智能建筑分部工程。每台设备、每个子系统能否正常工作,整个系统联合运行能否达到设计要求,这不可能完全由安装中静态质量检查与控制来保证,有一些缺陷和故障隐患也无法在静态被发现,因此空调工程正式投入使用前必须经过试运行与调试。空调系统试运行与调试一般分两个阶段,其主要任务是:

(1) 第一阶段,实现设备与系统由静到动的转换,进行单机与子系统试运行与调试,以及全系统无负荷联动试运行与调试,主要检查制造与安装的质量,排除故障和隐患,使各子系统协调工作,与负荷无关的主要技术指标达到设计要求,该过程由施工单位负责。

(2) 第二阶段,主要发现和解决设计中存在的问题。系统一般应带负荷运行,通过调

整，使空调系统在满足工艺条件的前提下，全面实现设计的各项技术经济指标。该过程也称系统综合效能测定与调整，由建设单位负责，设计、施工单位配合工作。

通风与空调分部工程的子分部划分 表 0-1

子分部工程	分 项 工 程	
送、排风系统	风管与配件制作	空气处理设备安装，消声设备制作与安装
防、排烟系统	部件制作	防排烟风口、常闭正压风口与设备安装
除尘系统	风管系统安装	除尘器与排污设备安装
空调风系统	风管与设备防腐	空气处理设备安装，消声设备制作与安装，风管与设备绝热
净化空调系统	风机安装	空气质量控制系统、空气处理设备安装，消声设备制作与安装，风管与设备绝热，高效过滤器安装
	系统调试	
空气能量回收系统	空气能量热回收装置安装，新风导入管道安装，排风管道安装，空气过滤系统的安装，空气能量回收装置系统运行试验及调试	
制冷系统	制冷机组安装，制冷剂管道及配件安装，制冷附属设备安装，管道及设备的防腐与绝热，系统调试	
空调水系统	管道冷热（煤）水系统安装，冷却水系统安装，冷凝水系统安装，阀门及部件安装，冷却塔安装，水泵及附属设备安装，管道及设备的防腐与绝热，系统调试	
地源热泵系统	埋地管换热系统，地下水换热系统，地表水换热系统，建筑物内系统，整体运转、调试	

空调工程施工作为一个生产过程，安装完成的空调系统就是产品。作为生产者，完成产品的试运行调试是施工单位的责任。在第一阶段，所有单机设备需要启动试运行，各子系统和全系统需要联合调试。虽然有的重要设备是由生产厂家派人试运行，但由于施工单位承担了全部工程的安装工作，最熟悉工程的具体情况，具有组织多专业、多工种技术力量配合的能力，必定是整个工作的主持者。在试运行调试中，如果设计、制造或安装被检查发现问题，应该由责任方负责解决。由于不带负荷，第一阶段主要检查制造与安装的质量，调试系统的运行状态。试运行调试所有规定的检测和调试项目应该达到国家现行规范的质量标准。在第一阶段试运行与调试合格以后，工程可以进入竣工验收程序。

第一阶段试运行与调试合格，并不能说明系统在负荷条件下就一定能达到设计的技术指标。第二阶段主要检查在带负荷条件下空调系统的运行情况。当某些指标达不到设计的要求时，还需进一步调整。由于需要空调系统服务的对象也处于工作状态，特别是工艺性空调，其效能测定与调整和车间生产有联系又有矛盾，因此应掌握好第二阶段试运行与调试的时间，宜安排在生产设备试运行或试生产阶段，当然这项工作只能由建设单位（或业主）来组织和实施。空调系统综合效能测定和调整的具体项目内容的选定，应由建设单位或业主根据产品工艺的要求进行综合衡量为好。一般以适用为准则，不宜提出过高的要求。第二阶段试运行与调试合格以后，可以进入工程移交程序。

空调工程、特别是大型工程的试运行与调试涉及项目多，技术难度大，持续时间也比较长。而且实施过程中建设、施工、设计以及监理单位与供应商要分别履行自己的责任。

本书的目的之一是帮助学习者了解在空调试运行与调试过程中工程参与各方的职责,领会整个过程的实施程序,掌握操作的基本方法。

0.2 空调系统运行管理的意义与现状

空调工程移交以后,其保修期为两个采暖期和供冷期。在此期间出现的问题,要分析是由于设计、制造、安装或是使用的原因,由责任方承担经济损失,而安装单位将履行保修职责。但使用单位也应对空调系统的运行制定完善的管理制度,安排专职人员对空调系统进行日常运行管理和维护保养工作。使用单位对人员的培训宜提前到空调设备安装阶段完成,通过参与空调系统的试运行与调试,以及在保修期配合安装单位工作,为以后的运行管理和维护保养积累经验。

对空调系统的运行管理,是继系统设计、设备制造和施工安装之后,第四个决定空调系统运行质量的重要环节。实践证明,空调系统管理人员具有良好的技术素质和责任心,在运行中执行正确的管理制度,可以及时发现和消除事故隐患,延长设备的使用寿命,使空调系统长期保持良好的技术状态。对于工艺性空调和净化空调,因其为生产和科研服务,运行状态将直接关系到产品的质量或科学研究的成败。对用于生物试验的净化空调系统,出现故障还可能造成灾难性后果。因此这类空调系统都应有健全的运行管理制度和技术良好的管理与操作人员。而对使用更广泛的大中型舒适性空调系统,使用单位普遍还未给予足够的重视。多项调查表明,许多空调系统运行都存在各种各样的问题,甚至有的故障已使房间无法实现正常的空气调节,而系统仍在盲目运行使用。我国某高校在对某一地区中央空调使用情况调查中竟发现有一单位空调系统的31个风机盘管,电磁阀卡死就有15个。还有的用户不熟悉空调的自动控制与节能系统,无法使这部分设备正常工作,造成对该部分的投资无法取得预期的效果。出现这种现状的另一个主要原因是缺乏从事空调系统运行管理的技术人才。前面已经讲到,空调系统具有设备多、技术先进、涉及专业广等特点,一般短期培训难以掌握技术要领。因此使用单位对制造厂生产、施工单位安装的成品质量,只是被动地接受,不能积极主动进行维护和保养。空调系统“带病”运行司空见惯,不但建筑室内环境无法满足要求,设备使用也达不到设计的寿命,甚至可能由“小病”酿成大事故,使国家和人民的财产遭受不应有的损失。众多空调系统运行管理不善,也会造成大量的能源浪费。我们希望这种现状尽快得以改善。高职院校供热通风与空调工程技术专业培养的学生,应该既能到安装施工第一线,又能适合空调系统运行管理的工作,本书也希望为培养这方面人才提供必备的基本知识。随着建筑物业管理的发展,大量懂理论、有技术的高职院校毕业生充实到该领域后,应该使空调系统的运行管理,乃至整个建筑设备物业管理的水平得到较大提高。

教学单元 1 空调测试仪表与使用方法

【教学目标】通过本单元教学，使学生理解测量误差分析的基本理论，了解空调系统在试运行与调试中常用的测量仪表，掌握仪表选择和使用方法。

空调系统在试运行与调试过程中要进行多项测量。测量工作能否顺利完成，测量精度能否满足要求，将取决于对测量仪表的选择和使用两个方面。因此，测试人员应该熟悉空调测试常用仪表，了解它们的结构组成、工作原理和基本特性，掌握正确的使用方法，并能对其测量数据的精确性进行分析和判定。本章介绍测量误差分析基本理论和空调系统测试中常用的仪表及使用方法。

1.1 测量仪表的基本特性

1.1.1 测量误差与测量精度

1. 测量误差及分类

任何测量都必定存在误差。测量误差是指对被测量进行测量时，测量结果与被测量真值之间的差异。测量误差根据其性质可以分为三类，即系统误差、随机（偶然）误差和过失误差。

（1）系统误差。其特点是在相同测量条件下，对同一被测量进行多次测量，产生的误差大小正负保持不变，或按一定规律变化。系统误差可以消除，例如用高精度级量仪检定其误差值并绘制修正表等，从测量结果中剔除系统误差。对测量仪表细心的保存、安装和使用也是避免产生系统误差的有效措施。

（2）随机（偶然）误差。是指在相同测量条件下，对同一被测量进行多次测量时，因受到大量微小的和无法掌控的随机因素的影响而产生的误差。测量中这种误差的大小正负变化没有一定规律，无法修正或消除，这种误差称随机误差或偶然误差。随机误差是误差理论研究的对象。在等精度测量中，随机误差服从统计规律。随着测量次数的增加，随机误差的算术平均值将逐渐接近于零，因此，多次测量结果的算术平均值 $\bar{x}$ 将更接近于真值 X 。

（3）过失（粗大）误差。这种误差是由于测量者粗心大意或操作不正确所造成的，如读错、记错、算错等产生的误差，其误差值往往较大，因此也称粗大误差。此类误差有时容易发现，有时则很难发现，一般用换人复测的方法可以避免，也可以采用数理统计分析方法予以剔除。

2. 测量精度

测量精度指测量结果与真值的接近程度，与测量误差对应，可以从三个方面进行描述，即准确度、精密度和精确度。

（1）准确度反映系统误差对测量结果的影响，系统误差大即准确度低。

(2) 精密度反映随机误差对测量结果的影响, 随机误差大即精密度低。

(3) 精确度同时反映系统误差和随机误差对测量结果的影响。

测量中应该避免出现系统误差和过失误差。如果测量中无过失误差, 已经修正或消除了系统误差, 对未发现或未掌握其规律的系统误差作为随机误差处理, 那么测量精度就只涉及随机误差。针对随机误差存在的必然性、不可预知性和不稳定性, 可应用基于数理统计理论的误差分析方法对测量数据组进行分析处理。

3. 随机误差的处理方法

对被测量进行有限 n 次等精度测量, 测量值数据组 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的算术平均值按下式计算:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1-1)$$

在工程测量中, 随机误差均可认为服从正态分布规律, 正态分布的概率密度函数为:

$$f(\delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \quad (1-2)$$

式中 $f(\delta)$ ——随机误差的概率密度函数;
 δ ——随机误差;
 σ ——随机误差的标准误差;
 e ——自然对数的底。

服从正态分布的随机误差具有如下特性:

- (1) 单峰性: 误差绝对值越小, 出现概率越大; 误差绝对值越大, 出现概率越小。
- (2) 对称性: 绝对值相同, 符号相反的误差出现的概率相等, 曲线具有对称性。
- (3) 有界性: 在一定的测量条件下, 随机误差的绝对值一般不会超过一定界限, 称为误差的有界性。例如, 随机误差落在 $[-3\sigma, 3\sigma]$ 区间的概率为 99.73%。
- (4) 抵偿性: 当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时, 随机误差总和为零, 即正误差和负误差的绝对值相等, 互相抵消。这是增加测量次数可以提高测量精度的理论依据。

如图 1-1 所示, 正态分布曲线的形状由测量数据的标准误差 σ 的大小决定。由式 (1-2) 可知, 当 σ 愈小时, 曲线呈窄而高形状, 说明数据集中, 误差小, 即测量的精度高。反之, σ 愈大, 曲线则宽而低, 说明误差大且分散, 即测量的精度低。因此, σ 反映了测量的精密度, 是评定测量精度的一个重要参数。

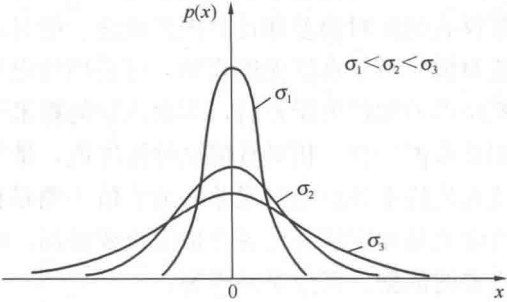


图 1-1 不同 σ 值的正态分布曲线

由于被测量真值实际上无法测得, 故一般常用多次重复测量所得的测量值的算术平均值 $\bar{x}$ 作为真值的近似值, 各测量值 x_i 与算术平均值之差, 称为残差 v_i (或剩余误差), 即:

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (1-3)$$

有限 n 次等精度测量时, 标准误差 σ 可由下式 (1-4) 计算。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1-4)$$

一般测量中常将 3σ 作为判别过失误差的依据, 3σ 也称为极限误差。检查测量数据组中的残差 v_i , 若 $|v_i| > 3\sigma$, 应将该次测量值剔除, 并重复式 (1-1)、式 (1-3)、式 (1-4) 的计算。根据随机误差的抵偿性, 随着测量次数的增加, 等精度测量数据组的算术平均值 $\bar{x}$ 必然趋近于被测量真值。算术平均值的标准误差计算公式为

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1-5)$$

由式 (1-5) 可知, 算术平均值的标准误差 $\sigma_{\bar{x}}$ 要比单次测量的标准误差 σ 小 $\sqrt{n}$ 倍, 若重复测量 4 次, 测量结果算术平均值的测量精度比单次测量提高一倍。 n 刚开始增加时, $\sigma_{\bar{x}}$ 减小很快, 所以增加测量次数, 可以提高测量精度。但当 n 超过 10 时, $\sigma_{\bar{x}}$ 减小将极为缓慢, 此时再增加测量次数已无意义, 一般测量可重复 4~6 次为宜, 如需再提高测量精度只有更换精度等级更高的测量仪器。

取置信概率为 99.73%, 测量的算术平均值的极限误差为 $3\sigma_{\bar{x}}$, 得到测量结果表示式为

$$x = \bar{x} \pm 3\sigma_{\bar{x}} \quad (1-6)$$

1.1.2 测量仪表的基本特性

空调系统运行调试的检测中, 被测量往往是动态量。例如, 即使是处于稳定运行的空调系统, 因负荷变化和各种干扰的影响, 室内温度并不恒定, 对室内温度多次重复测量, 是为了获得实际室内空调温度基数和波动范围 (即空调精度)。重复测量不同瞬时的空气温度, 数据组中包括了被测量本身的变化, 也含有测量误差, 但要求测量误差不会影响对被测量值大小和变化的判别。对被测量进行测量, 测量者操作认真负责和对测量结果进行数据处理可以提高测量精度。但测量结果的可靠程度主要取决于测量仪表的性质。下面介绍测量仪表的基本特性。

1. 测量仪表的精度

测量仪表的精度影响测量精度, 但二者的含义不同。要了解测量仪表的精度应先了解测量仪表的绝对误差和百分误差概念。绝对误差是测量值 (仪表读数) 与被测量真值之差的绝对值。由于真值无法获知, 可采用约定真值或相对真值代替。例如, 等精度测量中剔除系统误差和过失误差后, 多次测量的算术平均值可作为约定真值。在仪表检定中一般采用相对真值代替。相对真值也称标准值, 是用精度高 3~5 倍的标准仪表测量的结果。测量仪表校检中各点绝对误差的最大值为测量仪表的绝对误差, 用 Δ_m 表示。测量仪表最大允许误差是评定仪表是否合格的重要指标。绝对误差 Δ_m 是仪表检定中与最大允许误差进行比较的依据。百分误差则为:

$$\eta = \pm \frac{\Delta_m}{L_a - L_b} \times 100\% \quad (1-7)$$

式中 η —— 百分误差;

L_a 、 L_b —— 测量仪表的刻度上限与下限。

百分误差也称最大引用误差, 其绝对值去掉 “%” 后剩下的数字为仪表的精度。我国仪表工业目前采用的精度等级系列为: 0.005、0.01、0.02、(0.035)、0.04、0.05、0.1、

0.2、(0.35)、0.5、1.0、1.5、2.5、4.0、5.0。不同用途的测量仪表，系列中会有个别精度等级略有差别。如压力表有 1.5 和 1.6 两种精度等级。使用中的 1.5 级压力表允许误差按 1.6 级计算，准确度等级可不更改。

【示例 1-1】某测温仪表的测温范围为 200~1000℃，校验时得到的最大绝对误差为 5℃，试确定该仪表的精度等级。

【解】 由式 (1-7)，该仪表的百分误差为

$$\eta = \pm \frac{5}{1000 - 200} \times 100\% = \pm 0.625\%$$

去掉“%”后的绝对值为 0.625，处于 0.5 与 1.0 级之间，精度等级应定为 1.0 级。

若已知仪表精度等级，根据量程可反算最大允许误差并作为绝对误差 Δ_m 。仪表精度也称为仪表准确度，有时也用仪表的绝对误差直接定义仪表准确度。在理解测量仪表精度等级概念时应注意以下几点：

(1) 测量仪表的绝对误差与被测量的大小无关。例如，某一温度仪表的精度为 1.0 级，测量范围为 50~100℃，如果使用这一温度表来测量温度，无论你测的温度值是 60℃ 还是 80℃，绝对误差 Δ_m 均为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

(2) 同一精度，不同量程的两台测量仪表，在对同一被测量进行测量时，产生的绝对误差 Δ_m 可能不同。例如，两只精度均为 1.0 级的温度计，一个测量范围为 0~50℃，另一个为 0~100℃，用这两只温度计去测同一约 40℃ 的温度值，前者可能产生的绝对误差为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ，后者为 $\pm 1.0^\circ\text{C}$ 。因此选用测量仪表时，在满足被测量数值范围的前提下，尽可能选择小量程。一般对波动较大的被测量值，使其在仪表上限或全量程的 1/2~2/3 范围为宜，对较稳定的测量值，可使其处于上限或全量程的 2/3~3/4 范围，这样可以减小测量误差。

(3) 仪表的精度等级表示可能的误差值大小，但绝不意味该仪表在实际测量中会出现这么大的误差。另一方面，用户不能按自己检定的百分误差随意给仪表升级使用，但可以降级使用。

2. 恒定度

当外部条件不变时，用同一测量仪表对某一被测量进行重复测量时，指示值之间的最大差数与仪表量程之比的百分数为读数变差。读数变差也指当仪表指针上升（正行程）与下降（反行程）时，对同一被测量所得读数之差。变差大小即反映了仪表多次重复测量时，其指示值的稳定程度，称为恒定度。仪表读数的变差不应超过仪表的百分误差，如 1.0 级的测量仪表，读数变差不应超过 1%。

3. 灵敏度

灵敏度是表征测量仪表对被测量变化的反应能力。对于给定的被测量，测量仪表的灵敏度用仪表指示值的增量（输出增量，即仪表指针的线位移或角位移等）与引起该增量的被测量增量（输入增量）之比来表示，当输入与输出量的量纲相同时，灵敏度也称为放大比或放大因数。

有刻度盘的测量仪表，被测量的变化可以通过仪表指针位移被测出。较小的被测量变化若引起较大的仪表指针位移则灵敏度高，但被测量的变化波动会影响读数。两相邻刻线间隔所表示的量值差称为分度值。一般要求刻度间隔大于 0.8mm。有经验的测量人员可

以估读 1/3~1/4 分度值。

4. 灵敏度滞阻

灵敏度滞阻又称为灵敏阈或灵敏限,也称分辨率,是指能够引起测量仪表指示值出现可察觉变化的被测量的最小变化值。它表征了仪表响应与分辨输入量微小变化的能力。一般仪表的灵敏度滞阻应不大于仪表绝对误差的一半。

了解以上测量仪表的基本特性,对正确选用测量仪表会有所帮助。但仪表出厂标定的特性参数在使用中会发生变化,测量仪表应按有关规定定期校检。空调系统测试必须使用检定合格并在保证期内的仪表。

【示例 1-2】精度等级 0.4 级的压力表,量程 0~1.6MPa,分度值 0.01MPa。若要求测量误差不得超过 0.01MPa,试分析该型压力表精度等级是否满足测量要求。

解:由式 (1-7) 反算压力表绝对误差 Δ_m 值。

$$\Delta_m = \frac{0.4(1.6 - 0)}{100} = 0.0064(\text{MPa})$$

压力表绝对误差 Δ_m 为 0.0064MPa,小于测量精度要求,故可满足测量需要。

1.2 温 度 测 量

温度是一个重要的物理量。它是国际单位制 (SI) 中 7 个基本物理量之一,也是空调测试中的一个重要被测参数。

温度不能直接测量,而是借助于物质的某些物理特性是温度的函数,通过对这些物理特性变化量的测量间接地获得温度值。空调系统测试中常用的有玻璃管液体温度计和数字式温度计。

1.2.1 常用测温仪表

1. 玻璃管液体温度计

玻璃管液体温度计是利用液体体积随温度升高而膨胀的原理制作而成。由于液体膨胀系数远比玻璃的膨胀系数大,因此当温度变化时,就引起工作液体在玻璃管内体积的变化,从而表现出液柱高度的变化。若在玻璃管上直接刻度,即可读出被测介质的温度值。为了防止温度过高时液体胀裂玻璃管,在毛细管顶部须留有一膨胀室。玻璃管液体温度计一般多采用水银和酒精作为工作液,其结构如图 1-2 所示,在空调系统中也常作为检测仪表。为防止使用时碰碎玻璃管,通常在玻璃管外罩有金属保护套,图 1-3 是玻璃管温度计在空调制冷系统冷冻水管上的安装。

玻璃管水银温度计的工作液体为水银。它的优点是直观、测量准确、结构简单、造价低廉,可用于测量 $-30\sim 300^{\circ}\text{C}$ 的温度范围,因此应用广泛。但其缺点是不能自动记录、不能远传、易碎、测温有一定迟延。有时在控制系统的温度双位调节中也使用电接点玻璃管水银温度计作为敏感元件。

2. 数字式温度计

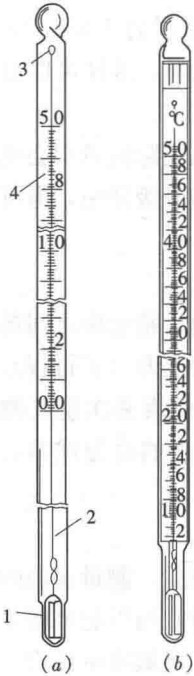


图 1-2 玻璃管温度计
(a) 外标式温度计;
(b) 内标式温度计
1—温包; 2—毛细管;
3—膨胀器; 4—标尺