

712.741-63
150

计 量 培 训 教 材

热学计量

国防科工委科技与质量司组织编写



A1031554

原 子 能 出 版 社

《计量培训教材》总编委会

总编审委员会

顾 问：栾恩杰

主 任：高志强

副 主 任：吴伟仁 马恒儒

委 员：(按姓氏笔画排列)

白忠泉	朱春元	牟安成	孙忠慧	孙家辉	杨长利
宋森尧	庞海涛	柯 松	柴芳蓉	徐炳仑	韩 俊
傅 宽					

总编辑委员会

总 主 编：马恒儒

副总主编：岳 峰 靳书元 宋素秀

委 员：(按姓氏笔画排列)

王广顺	冯永祥	达道安	朱正辉	李淑敏	吴申贤
辛光和	张 辉	张东军	张铄清	陆治平	陈开来
金慧茹	赵守林	赵志祥	胡焕性	俞德飞	贾成武
徐建良	唐亮武	常文君	梁燕熙	童本敏	曾令儒
谢静谦	熊开国	潘陆原			

总编委会办公室

主 任：岳 峰

成 员：(按姓氏笔画排列)

孔 玥	李宗扬	张 立	武晓雪	周 欣	常文君
游志红					

第2卷《热学计量》编委会

编审委员会

主 任：白忠泉

副 主 任：李淑敏 廖 理 王文革

委 员：(按姓氏笔画排列)

王 毅 由富恩 张春滨 李盈安 赵时安
贺宗琴 黄厚坤

编辑委员会

主 编：廖 理

副 主 编：王文革 贺宗琴

编 辑：(按姓氏笔画排列)

马森龙 王 毅 由富恩 杨永军 张春滨
张秋梅 陈 勇 赵时安 俞伦鹏 崔文德
薛 熊

责任编辑：傅 真

责任校对：徐淑惠 冯莲凤

版式设计：崔 彤

封面设计：李松林

总 序

计量是关于测量的科学，它涉及测量理论、测量技术和测量实践等多个领域。计量是科学技术的一个重要组成部分，是与人类社会进步和科学技术发展同步发展的。现代计量是国民经济建设和国防建设中一项重要的技术基础，是一个国家、一个地区和一个行业发展的探测器。计量技术是科技创新的基础技术，又是高技术产业化发展的一个重要条件。

老一辈无产阶级革命家聂荣臻元帅曾经指出“科技要发展，计量须先行”。半个世纪以来，国防科技工业计量工作者同全国计量同行一道，自力更生、艰苦奋斗、勇于创新、拼搏进取，形成了学科门类比较齐全的计量体系，创造了辉煌业绩，积累了宝贵经验，不断丰富和发展着现代计量。进入21世纪，产品测量数据的准确性、可靠性、可追溯性及国际互认性都对计量技术水平提出了更高的要求，我们要加强计量技术研究和计量人才队伍建设，为加入WTO后我国国家计量体系的建立作出应有的贡献。

当今的时代是竞争的时代，而人才是竞争之本，以信息技术为代表的高新技术迅速发展，对计量人员的整体素质提出了更高的要求。因此，迫切需要培养一大批掌握高新计量技术的人才。《计量培训教材》的编撰和出版，将为培养和造就一支为国民经济和国防现代化建设服务的计量人才队伍作出应有的贡献。

《计量培训教材》是一部12卷共18册1280余万字的大型计量专业技术丛书，是我国第一部学科专业齐全的计量培训教材。前10卷涵盖现代计量学10大专业技术领域，后2卷介绍计量技术和计量管理的基础知识，不仅展现了国内外计量科研的最新成果，而且突出了我国计量工作的特色。它

的出版凝聚了国防科技工业众多专家和计量工作者多年的心血，是集体智慧的结晶。希望读者通过阅读这部丛书，能够熟悉计量基础知识，并在实践中掌握运用，在计量工作中取得更大的成绩。

社会在进步，科技在发展。我相信，随着高新技术应用研究的积极开展，新的技术和新的成果将会充实和丰富《计量培训教材》的内容；专家和读者对书中的不足提出的批评指正意见，将会补充和完善这部丛书的内容，使之成为广大计量工作者的良师益友。

A stylized handwritten signature in black ink, appearing to read '张立' (Zhang Li).

2002 年 8 月 18 日

前 言

热学计量测试技术主要包括温度测试、校准计量理论、传热基础知识(包括部分流体力学)、湿度测试技术、计量标准装置、计量方法传递技术以及相应测量与校准技术的研究与应用。热学计量测试技术与人们的生产、生活息息相关,人们对它的研究由来已久,而且发展得比较成熟,国内外的专家、学者发表撰写了大量的论文和报告,其整个系统非常庞大,涉及的研究领域极其广泛,而就其内容的广度和深度而言,都不是一本专著和文集所能完全反映的。本卷书的着眼点在于热学范畴相关的、主要的计量测试技术,其中既有热学领域基础理论介绍,也有计量测试技术的介绍,是一本内容比较完整,阅读理解比较容易的培训教材。适合于热学计量测试人员,特别是从事国防科技工业的计量人员参考。

本卷书分为十篇,涉及温度、热流、湿度以及相关显示调节仪表的检定校准。第一篇基础知识部分介绍了温度、温标等热学计量的基本概念,同时对我国以及国际上温度计量传递系统、常用计量器具进行了概述。在后续九篇中,按校准、检定内容的不同,参照热学计量检定员考核专业项目分篇分别进行了介绍。其中“高温”、“中低温”项目,由于涉及的传感器类型不同,很难按照温度范围分类介绍,因此在第二篇至第四篇中分别按不同的测温原理进行介绍,主要介绍了热电偶、热电阻、膨胀式温度计的测温原理。由于低温测量有其特殊性,在第四篇中单独对低温状态下的相关测试技术以及计量器具的计量校准方法进行了论述;“光电高温”与“辐射温度计”项目在第六篇进行介绍,主要包括热辐射传热基本原理、非接触测温方法、相关技术,以及相关计量校准知识;“特种测温”项目可参见第七篇,该篇介绍了表面测温、气流测温等特殊工况下的多类测温误差,以及对导热误差、辐射误差、速度误差、动态响应误差的校准原理、方法,这类传感器的测温误差的校准不同于传感器敏感元件的静态标定(检定),测温时的工况对校准工作影响很大,本篇知识对从事温度测试工作有较强的实用指导作用。另外热学计量中的热物性考核项目,由于目前开展热物性(发射率、吸收率、透射率、导热系数、比热、热扩散系数、热膨胀系数)测试的单位很少,国家也没有相关的计量校准规程、规范,因此在本教材中没有进行单独介绍。但是与材料热物性相关的热流计校准项目,由于应

用较为广泛，在第八篇中进行了介绍。“多通道温湿度测量仪”、“温度显示调节仪表”项目的相关知识在第九篇中介绍；“湿度”作为新列入热学计量的考核项目，在第十篇进行了较详尽的介绍。

需要特别指出的是，由于本教材的主要使用对象是从事热学检定校准的计量人员，所以对所涉及的理论和技术不可能作全面深入的阐述，针对计量人员技术培训考核，每一篇的内容基本是先介绍相应的测量方法及原理，再介绍标准装置、原理、检定校准方法内容，并在每一章后配有相关思考题。在掌握热学计量基础知识的基础上，根据需要考核的项目，可分别参看相关篇章。需要更深入的了解某个方面的知识，应该查阅有关专著和文献。另外，为适应不同的培训考核对象，可将本卷教材的内容删减或增补，以达到培训考核目的。

本卷教材是由本卷编辑委员会成员分别编写，编写过程中得到了赵淇、李湜然、宋德华等专家的大力支持和指导，得到了有关单位和出版社的帮助，在此表示衷心感谢。

教材编写过程中，尽管编写人员做了很大努力，但由于经验不足和水平的限制，教材内容的取舍和叙述上如有不妥和差错之处，敬请专家和读者批评指正。

第2卷《热学计量》编委会
2002年6月

目 录

第一篇 热学计量基础知识

第一章 温度与温标	3
第一节 温度	3
第二节 温标	4
第三节 1990 年国际温标 (ITS-90)	6
思考题	7
第二章 温度量值传递系统	7
第一节 0.65 ~ 273.16K 范围温度计量器具检定系统	7
第二节 273.15 ~ 1234.93K(0 ~ 961.78℃)温度计量器具 检定系统	9
第三节 1234.93 ~ 2473K(961.78 ~ 2200℃)温度计量器具 检定系统	10
第四节 温度计量器具热电偶部分检定系统	11
思考题	12
参考文献	12

第二篇 电阻式温度计的检定

第一章 电阻温度计概述	15
第一节 电阻温度计测温原理	15
第二节 测温金属的选择	16
第三节 标准铂电阻温度计	17
思考题	20
第二章 标准铂电阻温度计	20
第一节 标准铂电阻温度计 (SPRT) 的电阻 - 温度关系	20
第二节 标准铂电阻温度计的检定设备	26
第三节 标准铂电阻温度计的检定	36
第四节 标准铂电阻温度计检定的不确定度分析	41
思考题	48

目 录

第三章	高温铂电阻温度计	48
第一节	高温铂电阻温度计 (HSPRT) 的内插公式	48
第二节	高温铂电阻温度计的检定	49
第三节	高温铂电阻温度计检定结果的数据处理	50
思考题		51
第四章	工业电阻温度计	51
第一节	工业电阻温度计 (IPRT) 和它的内插公式	52
第二节	工业铂电阻温度计的检定	53
第三节	工业铂电阻温度计检定的不确定度分析	55
第四节	热敏电阻	56
思考题		57
参考文献		57

第三篇 热电偶温度计的检定

第一章	热电偶测温原理	61
第一节	热电效应	61
第二节	热电偶回路的基本定律	64
思考题		68
第二章	标准热电偶温度计 (419.527 ~ 1084.62℃) 的检定	68
第一节	标准热电偶检定用设备	68
第二节	标准热电偶检定方法	69
第三节	标准热电偶检定不确定度分析	74
思考题		80
第三章	工作用热电偶温度计的检定	80
第一节	国际标准化热电偶	81
第二节	热电偶材料	84
第三节	热电偶的结构形式	87
第四节	热电偶补偿导线	88
第五节	工作用热电偶的检定	90
第六节	工作用热电偶检定的不确定度分析	93
思考题		95
第四章	低温铜-铜镍热电偶的检定	95
第一节	标准铜-铜镍热电偶的数学模型	95

目录

第二节	标准铜-铜镍热电偶的检定	97
第三节	低温铜-铜镍热电偶检定的不确定度分析	98
思考题	.....	100
第五章	钨铼热电偶的检定	100
第一节	钨铼热电偶	100
第二节	0~2 300 ℃钨铼热电偶检定装置	103
第三节	0~2 300 ℃钨铼热电偶检定方法	107
第四节	2 300~3 000 ℃钨铼热电偶的检定	114
第五节	钨铼热电偶检定的不确定度分析	115
思考题	.....	118
参考文献	.....	119

第四篇 膨胀式温度计的检定

第一章	玻璃液体温度计概述	123
第一节	玻璃液体温度计测温基本原理	123
第二节	玻璃液体温度计的结构	124
第三节	玻璃液体温度计的误差影响因素	127
第四节	玻璃液体温度计检定用设备	130
思考题	.....	135
第二章	标准水银温度计的检定	135
第一节	水银温度计检定用恒温槽温场的测试	135
第二节	一、二等标准水银温度计的检定方法	137
第三节	标准水银温度计的检定的不确定度分析	138
思考题	.....	144
第三章	工作用玻璃液体温度计的检定	144
第一节	工业和实验室用玻璃液体温度计的检定	144
第二节	贝克曼温度计的检定	145
第三节	石油产品试验用温度计的检定	147
第四节	气象用玻璃液体温度计的检定	149
第五节	实验室专用温度计的检定	151
第四章	压力式温度计和双金属温度计的检定	152
第一节	压力式温度计的检定	152
第二节	双金属温度计的检定	154

目 录

思考题	155
参考文献	155

第五篇 低温计量

第一章 低温计量基础知识	159
第一节 低温液体及其使用	159
第二节 实验用杜瓦瓶	164
第三节 低温检定与分度	168
思考题	172
第二章 标准铈铁热电阻温度计的检定	172
第一节 概述	172
第二节 标准铈铁热电阻温度计的检定方法	174
第三节 标准铈铁热电阻温度计的不确定度分析	176
思考题	181
第三章 标准套管铂电阻温度计的检定	181
第一节 标准套管铂电阻温度计的基本测温原理	181
第二节 技术要求和检定条件	182
第三节 标准套管铂电阻温度计的检定方法	184
思考题	185
第四章 低温工作用温度计的检定	186
第一节 工业热电阻	186
第二节 半导体热敏电阻	189
第三节 工业铂、铜热电阻的检定	191
第四节 低温热电偶检定	196
思考题	204
参考文献	204

第六篇 辐射温度计的检定

第一章 辐射测温的基础知识	207
第一节 有关热辐射的基本概念	207
第二节 黑体辐射定律	215
第三节 表观温度	219

目 录

第四节	有效波长概念	222
思考题	.....	225
第二章	辐射温度计	226
第一节	辐射测温仪表的发展概况	226
第二节	辐射测温仪表的分类和比较	228
第三节	光学高温计	231
第四节	光电高温计与光电高温比较仪	238
第五节	部分辐射温度计	244
第六节	辐射感温器	245
第七节	比色法测温仪表	249
思考题	.....	251
第三章	辐射温度计校准装置	252
第一节	固定点黑体炉	252
第二节	低温黑体辐射源	252
第三节	中温黑体炉	255
第四节	高温黑体炉	255
第五节	标准温度灯	257
第六节	光学高温计检定装置	259
思考题	.....	260
第四章	辐射温度计的检定	261
第一节	工作用隐丝式光学高温计的检定	261
第二节	工作用辐射温度计的检定	273
思考题	.....	282
参考文献	.....	282

第七篇 特殊状态下的温度测量与校准

第一章	气流温度测量与校准的基础知识	285
第一节	几个基本概念	285
第二节	温度传感器气流测温偏差	288
思考题	.....	294
第二章	温度传感器动态与稳态温度校准装置	295
第一节	温度传感器动态与稳态校准装置介绍	295
第二节	温度传感器动态与稳态校准装置校准	297

目 录

思考题	300
第三章 温度传感器动态与稳态温度校准	300
第一节 温度传感器动态与稳态校准规范	300
第二节 温度传感器恢复特性的校准	301
第三节 温度传感器的辐射修正系数校准	305
第四节 温度传感器导热修正校准	310
第五节 温度传感器的动态校准	311
思考题	313
第四章 表面温度计的校准	314
第一节 表面温度测量的理论基础	314
第二节 表面温度计的校准	316
思考题	317
参考文献	317

第八篇 热流计校准

第一章 热流测量的基本原理	321
第一节 导热式测量原理	321
第二节 对流热传递	324
第三节 辐射式测量原理	326
思考题	329
第二章 热流校准基础知识	330
第一节 热流基本概念及单位	330
第二节 热流计的种类	330
思考题	331
第三章 典型热流计工作原理	332
第一节 圆箔式热流计	332
第二节 塞式热流计	333
第三节 热阻式热流测头	334
第四节 其他热流计简介	341
思考题	343
第四章 热阻式热流测头的校准	343
第一节 标定的物理基础	343
第二节 绝对法校准	344

目录

第三节	其他绝对法	347
第四节	比较法校准	349
第五节	标准不确定度分析	350
思考题		351
第五章	1 ~ 15 W/cm ² 辐射热流校准装置	351
第一节	系统组成及工作原理	352
第二节	标准辐射源	353
第三节	校准方法	354
思考题		355
第六章	15 ~ 150 W/cm ² 辐射热流校准装置	355
第一节	系统组成及工作原理	355
第二节	辐射热流计校准方法	358
思考题		361
第七章	热流测量校准技术展望	362
第一节	热流计种类扩展	362
第二节	蒸汽热流计校准	363
第三节	0.05 ~ 2 W/cm ² 热流校准装置	364
思考题		365
参考文献		365

第九篇 温度显示和调节仪表检定

第一章	动圈式仪表的检定	369
第一节	动圈仪表测量机构	369
第二节	动圈仪表的测量线路	371
第三节	动圈仪表的调节电路	373
第四节	动圈式仪表的检定	377
思考题		383
第二章	电子自动平衡式显示仪表	383
第一节	概述	384
第二节	电子电位差计	385
第三节	微电机	389
第四节	电子自动平衡电桥	390
第五节	自动平衡显示仪表的检定	391

目 录

思考题	394
第三章 数字温度指示调节仪	395
第一节 数字温度指示调节仪的基础知识	395
第二节 数字温度指示调节仪的工作原理	397
第三节 数字温度指示调节仪的检定	399
思考题	419
参考文献	419

第十篇 湿度计的检定

第一章 湿度基础知识	423
第一节 水的性质	423
第二节 空气的性质	427
第三节 湿度表示方法	429
思考题	433
第二章 湿度测量方法	433
第一节 利用物质几何尺寸变化的测湿法（伸缩法）	434
第二节 干湿球法	436
第三节 冷凝露点法	447
第四节 电湿度测量法（电阻法、电容法）	450
第五节 电解法（库仑湿度计）	455
第六节 其他湿度测量方法	457
思考题	460
第三章 湿度计量标准	461
第一节 湿度计量标准的传递	461
第二节 重量法	463
第三节 湿度发生器	466
思考题	480
第四章 湿度检定方法	480
第一节 标准通风干湿表的检定	480
第二节 毛发表检定	483
第三节 露点仪检定	488
第四节 分流式湿度发生器的检定	495

目 录

第五节 其他常见湿度测量仪表的校准方法	499
第六节 环境试验用温度、湿热设备的校准方法	503
思考题	509
参考文献	510

附 录

附录 A	1990 年国际温标 (ITS-90)	513
附录 B-1	0.65~273.16 K 范围温度计量器具检定系统框图	524
附录 B-2	273.15~1 234.93 K (0~961.78 °C) 温度计量 器具检定系统框图	525
附录 B-3	1 234.93~2 473 K (961.78~2 200 °C) 温度 计量器具检定系统框图	526
附录 B-4	铂铑 10-铂热电偶检定系统框图	527
附录 B-5	铂铑 30-铂铑 6 热电偶检定系统框图	528
附录 C	Wexler 的饱和水汽压表 (纯水平面)	529
附录 D	Wexler 的饱和水汽压表 (纯冰平面)	532

第 **1** 篇



热学计量基础知识