

# 微型制冷器

张国刚 编著

国防工业出版社

## 内 容 简 介

传感器是现代测量控制处理系统必不可少的组成部分，它常关系着一个自动化系统的成败，因而日益受到技术人员的重视。

本书是一本介绍传感器技术原理和应用的科普读物，首先形象地介绍与人的视觉、触觉、嗅觉、听觉和味觉对应的光、温度、磁、煤气、湿度、压力、味等传感器以及超导量子干涉器件的原理；其次从仿生学的角度介绍了人体和各种动物的感官功能；最后介绍用于家用电器、钟表、照相机、测试仪器、汽车、医疗仪器、煤气检测、公害检测、防火系统、防盗系统、火山监测、地震探测、鱼群探测、气象卫星、人造卫星、航天飞机等各种类型的传感器。

本书形象生动、通俗易懂，适于具有中等文化程度的青年工人、学生、以及科技人员阅读。

センサ技術新時代

高橋 清 小長井 誠 編著

工業調査会 1981年

\*

## 信息社会的传感器

〔日〕高橋 清 小長井 誠 編著

黄辉光 译

---

新時代出版社出版 新华书店北京发行所发行

国防工业出版社印刷厂印刷

787×1092毫米 32开本 6印张 131千字

1985年10月第1版 1985年10月北京第1次印刷

印数：0001—8300册

---

统一书号：15241·61 定价：1.25元

## 前 言

微型制冷技术是近代低温工程中的一个重要分支，是一门崭新的应用技术。

在近代科学技术中，如红外技术、激光技术、空间技术、高真空技术、通信技术、超导技术、低温电子学、低温外科学、低温生物学等领域都须要用微型制冷器提供新形式的低温冷源。微型制冷技术虽然只有二十多年的历史，但是发展的速度是很快的。为了满足各个科技领域的需要，研制成许多种微型制冷器。目前，微型制冷技术已从迅速发展阶段转入稳步提高质量和进一步推广应用阶段。本书是为了适应这个发展的形势，根据国内外的有关资料和多年实际工作的体会编写而成的。

本书的着眼点是微型制冷器的实际应用。为了便于读者了解、掌握和选用微型制冷器，本书以比较详细的结构图和许多技术数据图表系统地介绍了典型微型制冷器的工作原理、构造特点、技术指标、应用范围、操作维护和选用的准则，以及设计计算的基础知识。对于正在发展的制冷方法，如辐射制冷、涡流制冷，以及低温传热元件——深冷热管——等也做了比较详细的介绍，以供读者学习参考。

在编写过程中，得到领导和同志们们的热情鼓舞和帮助。特别是中国制冷学会副秘书长、《制冷学报》主编姚辅民总

#### IV

工程师，在繁忙中对全文进行了多次审阅，提出许多宝贵意见。另外，吴仰贤高级工程师、孙星南工程师、吴桐珠同志等也给予了有益的指导和帮助。在此谨向他们表示衷心感谢。

由于作者的理论水平和经验有限，书中的缺点错误肯定不少，恳切希望读者批评指正。

## 目 录

<b>第一章 微型制冷技术的概述</b> .....	1
一、制冷与低温技术的区分 .....	1
二、微型制冷技术的研究对象及特点 .....	2
三、微型制冷技术的应用 .....	2
1. 在低温电子技术中的应用 .....	2
2. 在红外技术中的应用 .....	3
3. 在激光技术中的应用 .....	6
4. 在冷冻外科中的应用 .....	6
5. 在低温生物学中的应用 .....	8
6. 在超高真空技术中的应用 .....	9
7. 在超导技术中的应用 .....	9
8. 在空间技术中的应用 .....	10
<b>第二章 获得低温的方法</b> .....	11
一、相变制冷 .....	11
二、节流的冷效应 .....	12
三、气体等熵膨胀制冷 .....	17
四、绝热放气制冷 .....	19
五、涡流制冷 .....	23
六、珀尔帖冷效应 .....	24
七、辐射制冷 .....	25
<b>第三章 采用相变制冷的制冷器</b> .....	27
一、杜瓦瓶 .....	27
1. 一般结构 .....	27

2. 杜瓦瓶的设计计算 .....	30
3. 制造工艺 .....	35
4. 应用及优缺点 .....	37
<b>二、液氮双相传输制冷器 .....</b>	<b>38</b>
1. 一般结构 .....	38
2. 气膜绝热原理 .....	39
3. 制冷功率 .....	41
4. 流量（或温度）的控制 .....	42
5. 应用及特点 .....	44
<b>三、固体制冷器 .....</b>	<b>47</b>
1. 一般结构 .....	47
2. 放泄管的设计 .....	49
3. 应用及特点 .....	51
<b>四、相变制冷器的性能 .....</b>	<b>53</b>
1. 杜瓦瓶和液氮传输制冷器的性能 .....	53
2. 固体制冷器的性能 .....	57
<b>第四章 节流制冷器 .....</b>	<b>61</b>
一、一般结构 .....	61
二、热交换器设计 .....	62
三、制造和封装 .....	65
四、气体纯化 .....	67
五、影响制冷器性能的因素 .....	69
六、制冷循环形式及应用 .....	70
七、节流制冷器的性能 .....	72
1. 闭合循环节流制冷器的性能 .....	72
2. 开式循环节流制冷器的性能 .....	75
<b>第五章 利用气体等熵膨胀的制冷机 .....</b>	<b>79</b>
一、斯特林循环制冷机 .....	79

1. 一般结构 .....	79
2. 制冷循环过程 .....	80
3. 设计计算 .....	81
4. 再生器 .....	89
5. 影响机器性能的因素 .....	93
6. 应用及特点 .....	98
<b>二、威勒米尔循环制冷器 .....</b>	<b>102</b>
1. 一般结构 .....	102
2. 制冷循环过程 .....	103
3. 设计计算 .....	105
4. 应用及特点 .....	109
<b>三、气体等熵膨胀的制冷机性能 .....</b>	<b>111</b>
1. 斯特林循环制冷机的性能 .....	111
2. VM 循环制冷机的性能 .....	115
<b>第六章 利用绝热放气的制冷机 .....</b>	<b>118</b>
<b>一、G-M 循环制冷机 .....</b>	<b>118</b>
1. 一般结构 .....	118
2. 制冷循环过程 .....	120
3. 设计计算 .....	123
4. 应用及特点 .....	125
<b>二、S 循环制冷机 .....</b>	<b>130</b>
1. 制冷机的结构 .....	130
2. 制冷循环过程 .....	131
3. 设计计算 .....	132
4. 应用及特点 .....	135
<b>三、G-M 和 S 循环制冷机的性能 .....</b>	<b>136</b>
<b>第七章 涡流管制冷器 .....</b>	<b>139</b>
<b>一、一般结构 .....</b>	<b>139</b>
<b>二、设计计算 .....</b>	<b>141</b>
1. 涡流管制冷器的性能计算 .....	141

2. 涡流管制冷器结构尺寸的计算	144
三、涡流管制冷器的性能及特点	147
<b>第八章 半导体制冷器</b>	149
一、制冷原理	149
二、设计计算	150
三、多级制冷及应用	154
四、半导体制冷器的性能	157
<b>第九章 辐射制冷器</b>	160
一、结构	160
二、设计计算	163
1. 冷片的工作温度	163
2. 辐射器的工作温度	163
3. 辐射角系数	164
三、制冷器的应用	169
四、辐射制冷器的性能	172
<b>第十章 深低温热管</b>	176
一、结构及工作原理	176
二、结构材料	177
三、应用及特点	179
1. 辐射制冷器/热管系统	180
2. VM 制冷器/热管系统	181
3. 固体制冷/热管/辐射制冷系统	181
<b>第十一章 仪器设备对制冷器的要求及选择</b>	
<b>制冷器的准则</b>	184
一、仪器设备对制冷器的要求	184
1. 室内和野外的仪器设备对微型制冷器的要求	184
2. 舰载仪器设备对微型制冷器的要求	184
3. 机载仪器设备对微型制冷器的要求	185
4. 星载仪器设备对微型制冷器的要求	185
二、选择制冷器的准则	185
参考资料	189



# 第一章 微型制冷技术的概述

## 一、制冷与低温技术的区分

制冷与低温技术是从十九世纪中叶开始发展的，到现在已有一百多年的历史了。它在工业、农业、国防、医疗卫生、商业、科学研究，以及日常生活等方面获得了广泛的应用。

制冷与低温技术是指用人工制冷方法使某一物体或某一空间达到并保持所需要的低温。

目前，获得低温的方法很多，可分为物理方法和化学方法，而绝大多数制冷方法是属于物理方法。物理方法制冷是依靠物质的状态变化来实现的。这类物质称做制冷工质（简称工质），或称制冷剂。按照现代的概念，制冷技术与低温技术是有区分的。从环境温度到120K（-150°C）称普冷区，这属于制冷技术研究的领域。它是以氨、氟里昂及某些碳氢化合物为制冷剂，通过高压液体的膨胀达到低温，并依靠液体的气化吸热来获得冷量。从120K到绝对零度（-273°C）称深冷区，这属于低温技术（或深冷技术）研究的领域。它是以气体（如空气、氮、氖、氢及氦等）为制冷工质，通过高压气体的绝热膨胀达到降温，或者使气体液化。但是，因为微型制冷技术是研究工作温度从4.2~200K的各种微型制冷器，所以就没有制冷技术与低温技术的区分，统称做微型制冷技术。

## 二、微型制冷技术的研究对象及特点

微型制冷技术的出现及发展与军事尖端科学技术有着十分密切的关系。五十年代初，首先由美国开始，到现在虽然只有二十多年的历史，但发展非常迅速，它已成为近代低温工程中一个崭新的分支。

概括地说，微型制冷技术的研究对象是依据获得低温的方法，研制以体积小、重量轻、制冷温度范围宽、制冷量小、效率高、功耗少为特点的各种类型微型制冷器及其应用技术。

微型制冷工作原理虽然同常用的低温制冷相类似，但是，它研究的范围要深广得多。如只有半支香烟大的微型自调式节流制冷器，要由十多个精密小巧的零件组成，因此要求精心设计，精密工艺。另外，为了满足特殊的需要，还要研究一些特殊的制冷方法，如研究在宇宙空间用热辐射方法制冷。

根据选用的制冷工质的不同，微型制冷器有五个工作温度级：干冰温度级（195K）；液氮温度级（77K）；液氖温度级（27K）；液氢温度级（20K）；液氦温度级（4.2K）。制冷量的范围为0.1~150瓦。

## 三、微型制冷技术的应用

### 1. 在低温电子技术中的应用

微型制冷技术是低温电子技术的基本组成部分。低温电子技术是近代电子工程中的最活跃的分支之一。低温电子器件具有噪声低、灵敏度高、响应速度快和损耗小等特点，因此，它在现代通信系统中有着重要的应用。例如，卫星地面接收

系统中的冷参量放大器，就是用 G-M 循环制冷机冷却到 20 K 以下的低温。在这样的温度下，它的温度噪声只有几个分贝。因此，在我们观看由通信卫星转播的电视节目时，虽然传送距离上万公里，但电视画面仍然既清晰又逼真。这是低温电子技术立下的汗马功劳。

另外，有巨大潜力的固体量子放大器和光量子放大器，要冷却到 4.2 K 的低温才能工作，目前这样的微型制冷器还没有实用化。但是，随着微型制冷技术的不断发展，肯定会为它们的应用开拓出十分广阔的天地。

## 2. 在红外技术中的应用

红外技术是红外线技术的简称。那么什么是红外线呢？

在物理学中讲道，凡是温度高于绝对零度的物体都能发射出热辐射，这热辐射即称红外线。红外线实际是波长约为 0.75~1000 微米的电磁波。因它在可见光谱红光边界以外，红外线即由此得名。红外线是不可见的光线。虽然发现它将近两个世纪了，但是成为一门新的应用技术——红外技术，是从本世纪前半叶开始的。红外技术包括四个方面：（1）红外辐射的研究及利用；（2）围绕着探测红外辐射的一些相关技术，如红外光学材料、红外探测器及其材料、微型制冷技术；（3）红外系统（包括光学、电学、机械等）；（4）红外整机系统在各个领域中的应用技术。因此，红外技术是一门综合性应用技术。它的核心是研制探测不同波长的红外探测器及其材料。红外探测器是红外整机系统的“眼睛”。红外探测器灵敏度的高低直接影响红外整机的技术性能。

探测器分为热探测器和光子探测器两大类。它们性能的优劣，一般都与冷却温度有关，特别是响应波长长、噪声低、

探测率高的光子探测器, 绝大多数必须冷却到低温或深低温, 才能工作或获得最佳性能。图 1-1 是几种典型红外探测器的探测率与冷却温度的关系。

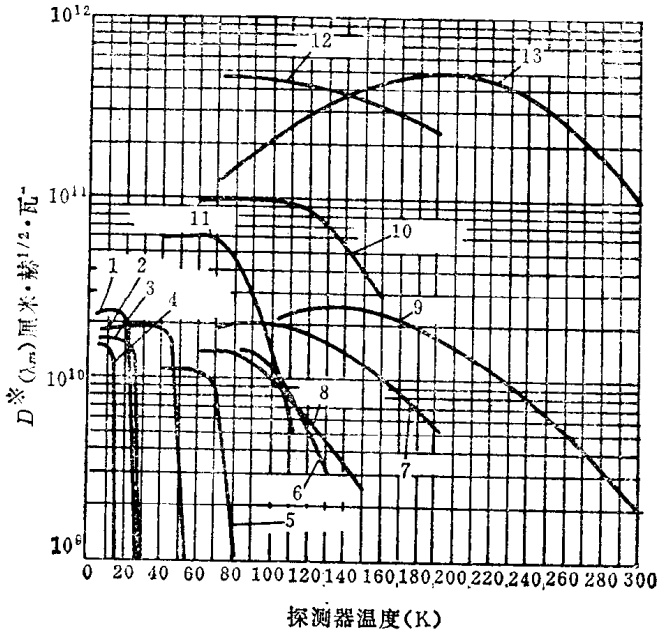


图1-1 典型探测器的探测率( $D^*$ )随冷却温度的变化  
 1—Ge:Cu(1800赫); 2—Ge:Hg(1800赫); 3—Ge:Cd(1800赫); 4—Ge:Zn(1800赫); 5—Ge:Au(1800赫); 6—HgCdTe(500赫); 7—PbSe(840赫); 8—PbSnTe(1000赫); 9—PbSe(840赫); 10—InSb(PV)(1800赫); 11—InSb(PC)(1800赫); 12—InAs(PV)(1800赫); 13—PbS(150赫)。

一般说来, 响应波长1~3微米的探测器, 可在室温下工作。响应波长3~8微米, 要冷却到195~77K。响应波长超过8微米, 要冷却到77~20K, 甚至几K。

另外, 探测器在低温时的探测率受背景噪声限制, 因此

用冷却屏可以降低背景噪声，提高探测率。图 1-2 是冷屏和冷滤光片对提高硒化铅探测器的探测率的作用。曲线 1 是无冷屏的；2、3 和 4 是同一个探测器，但冷屏的孔径依次减小；5 用同 4 一样的冷屏，但它加了一片冷却的石英滤光片，把探测器的截止响应波长限制在 5 微米以内。

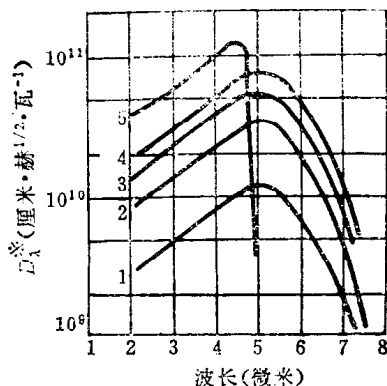


图1-2 冷屏和冷滤光片对提高硒化铅探测率的作用

由图可见，加了冷屏，探测器的峰值探测率提高了一个数量级。

图 1-3 是冷屏与红外探测器的耦合结构。

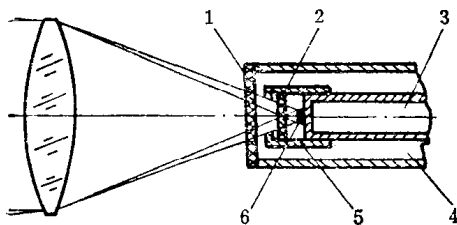


图1-3 冷屏与探测器的耦合结构

1—红外窗口；2—冷滤光片；3—制冷腔；4—真空层；  
5—冷屏；6—探测器。

由上述可见，探测器性能的优劣与冷却温度是十分密切的。因此，在发展红外技术的时候，必须同时注意发展微型制冷技术，从而推动红外技术的应用范围不断地扩展。

### 3. 在激光技术中的应用

激光的发现和应用是近代科学技术中的重大成就之一。制冷技术是激光技术的组成部分。在激光技术中有几个主要部件须要冷却：（1）激光器的氙灯工作时，它的能量除了一部分以激光的形式输出外，其余的均转变成热能，为了维持激光器的连续工作，须用小型冷却器把这些废热排掉；（2）激光探测器，如光电倍增管，在室温下工作时，热噪声比较大，灵敏度低。如用冷却器把它冷却到干冰温度，热噪声会大大降低，灵敏度大大提高；（3）储能器是激光装置中的主要部件，有时要求它在瞬间放出数十亿到数百亿焦耳的能量。大家知道，电能可以用电池、电场或磁场来储存。用电池储存电能是大家都熟悉的，虽然它储存电能密度很高，但是，它充电、放电时间都很长，所以无法在瞬间放出很大的能量。电场储能是用电容器，虽然它充电、放电时间较短，瞬间能提供较大能量，但是，它储能密度较低，并有漏电损耗，故不适于长期储能，不是很理想的储能器。磁场储能是用线圈，用普通导线绕制的线圈，因有电阻损耗，电流迅速衰减，储存的能量很快耗尽。如线圈是超导体制作的，把它冷却到超导温度，即电阻为零，则电流就能持续不减，储存的能量就毫无损耗地长久保存下来，并且瞬时即可将能量释放出来。这种新型储能器是很理想的，它的成功将给激光炮的研究带来光明的前景。

### 4. 在冷冻外科中的应用

冷冻外科是用冷冻方法，把病灶的细胞冻死，借以达到治疗疾病的目的。

将“冷”用于医治某些疾病，已有悠久的历史。公元前

2500年，我国民间就开始流传用冰和盐的混合物贴敷在乳房及颈部的肿块上，以消肿止痛，这可能是最早的冷冻外科。由于受当时制冷技术条件的限制，这种医疗方法未能广泛地开展起来。

进入二十世纪后，由于制冷及低温技术的发展，为开展冷冻医疗创造了条件。1961年，美国神经外科教授库培尔与林德公司研制成世界上第一台液氮低温医疗器，冷头温度可达到83K，对100名巴金森氏病患者进行脑垂体冷冻治疗，获得了良好的效果。从此冷冻疗法在各国迅速地发展起来，成为现代医学的一个新学科——冷冻外科学。它在普通外科、皮肤科、眼科、肛肠科、口腔科、耳鼻喉科、妇科、泌尿外科、脑外科、肿瘤外科的临床中普遍地应用。特别是在征服癌症方面，已显示出它的有效性。如国内有资料报导，对晚期肺癌患者用冷冻治疗后，有的生存期达四年以上。临床还证明，用冷冻治疗某些癌症，还有免疫性。图1-4是左眼皮肿瘤患者冷冻治疗前后的照片，从照片上可以清楚地看出冷冻医疗的有效性和优越性。

冷冻疗法的优点是手术简单、迅速、安全、视野清楚、不用麻醉、不流血、不感染、疤痕小，不管身体强弱、男女老少，都可接受冷冻治疗，费用非常低廉。目前冷冻外科已成日常有效的治疗手段之一。因此，国际制冷学会为了促进冷冻外科学的发展，设立了C<sub>1</sub>专业委员会，它的内容是：冷冻医疗、低温生物学、小型制冷器械等，每两年召开一次国际性的学术交流会。中国制冷学会也设立了相应的专业委员会，每年都召开全国性的冷冻医疗及其器械学术交流会，大大地促进了我国冷冻医疗的发展。我国自1960年开展冷冻医

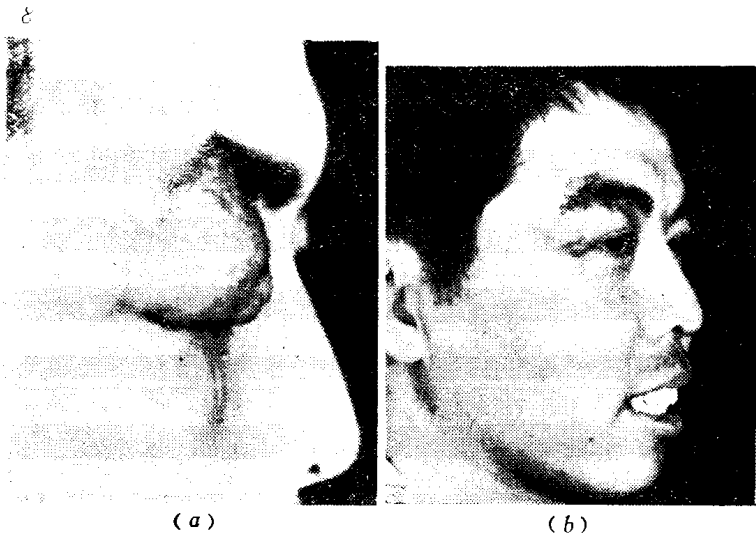


图1-4 肿瘤患者冷冻治疗前后的照片  
(a) 治疗前；(b) 治疗后。

疗以来，现在各大城市及其郊区医院大多数都开设了冷冻医疗及其研究小组。

微型制冷技术的任务之一，是为冷冻外科提供各种类型的小巧的冷冻医疗器械。

### 5. 在低温生物学中的应用

低温生物学是研究生物组织细胞在低温下生存特性的科学。它是近代生物学中最活跃的分支之一。如人的血液、皮肤、各种组织器官、疫苗等，在低温下长期储存的方法及机理的研究是重大的应用技术；用人工制冷方法研究人体冻伤的机理，这对设计军事人员现代防寒装备是很有实际意义的。

另外，在畜牧业中，用液氮作制冷剂，保存良种牛的精液，进行人工受精，这对繁殖改良品种不但有科学意义，而且有很大的经济效益。

制冷及低温技术能为低温生物学研究工作提供各种类型



的制冷装置及制冷剂贮存容器。

## 6. 在超高真空技术中的应用

在科学研究及工业生产中，许多工艺设备，如真空光学镀膜设备、高真空蒸发设备等，过去都是用油扩散泵获得高真空，这样，油的蒸汽就有可能污染真空室，从而影响产品质量。随着科学技术的发展，要求真空技术提供“清洁”的真空，即无油的真空。目前有几种获得无油真空的方法，其中以微型制冷器构成的低温泵（或称冷凝泵）为最好。低温泵把在真空室里的冷凝板冷却到20K以下的低温，于是真空室里的气体就被冻结成液体或固体，从而达到抽气作用。低温泵不但抽速大、效率高、获得高真空快，而且还有工作可靠、操作维护简便等优点。

目前，国内外已研制出多种适于做冷凝泵的微型制冷机，它们的制冷温度在20K以下，制冷量大于2瓦。

## 7. 在超导技术中的应用

超导体，作为固体物理学的一个崭新的分支，不过只有七十多年的历史；而作为一门新的应用技术，那还是本世纪六十年代以后的事。短短十几年的发展，它就已在电机、输电、储能、高速运输等方面得到了应用，显示了它的优越性。而在超导电子技术中更显示出迷人的前景。

那么，什么是超导体呢？1911年，有人做了这样一个实验：将水银冷却到零下40℃以下，使它凝固成一条线，然后继续冷却到4.2K（-269℃）附近，在水银线上通几毫安的电流，并测量它两端的电压。这时发现，当冷却温度稍低于4.2K时，水银线的电阻突然消失了。这种奇妙的现象，引起了人们极大的重视。人们把这种电阻突然消失的零电阻现象，