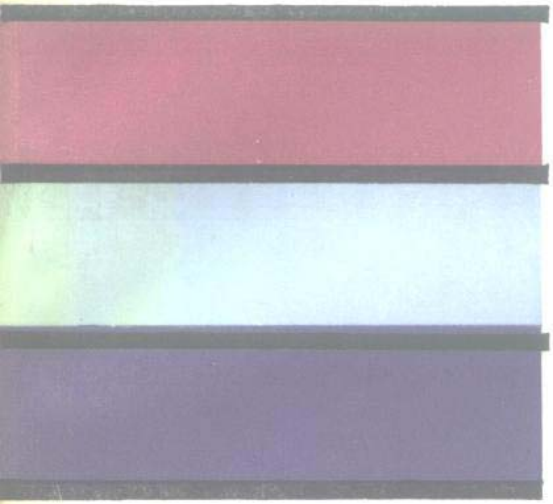

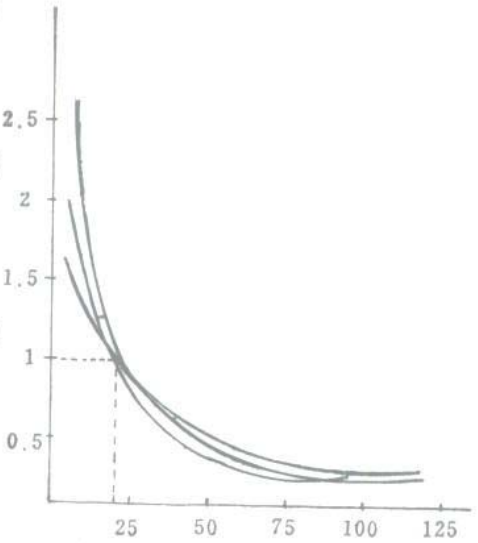

机械故障诊

故障诊断的热像技术

虞和济
宋利明 编

冶金工业出版社

TH81
Y79

机械故障诊断丛书

故障诊断的热像技术

虞和济　宋利明　编

冶金工业出版社

（京）新登字036号

内 容 简 介

本书为《机械故障诊断丛书》之一。本书根据机械设备故障诊断的需要简述了温度监测技术的原理和方法，简单介绍了温度监测用的接触式和非接触式传感器，重点讲述了红外测温技术，详细介绍了热像仪的原理、构造和使用情况，最后一章介绍了红外诊断技术在铁路交通、冶金、石化、电力、机械和建筑等工程中的应用情况。

本书可供从事故障诊断工作的工程技术人员使用，也可供大专院校有关专业的师生参考。

机械故障诊断丛书

故障诊断的热像技术

虞和济　宋利明　编

*

冶金工业出版社出版发行

（北京北河沿大街嵩祝院北巷39号）

新华书店总店科技发行所经销

北京大兴孙中印刷厂印刷

*

850×1168 1/32　印张 4 3/4　字数 120 千字

1992年10月　第一版　1992年10月　第一次印刷

印数 00,001～4,000 册

ISBN 7-5024-1004-X

TH·162　定价4.00元

前　言

《机械故障诊断丛书》共十本，包括故障诊断的基本原理、故障诊断的振动理论基础、故障诊断的振动测试技术、故障诊断的振动信号处理、失效分析与故障预防、振动诊断的工程应用、故障诊断的声学方法、故障诊断的热像技术、故障诊断的专家系统和故障诊断的数学力学基础。本套丛书由虞和济教授主编。

本书主要讲述了故障诊断的一种新技术热像诊断技术，为了使读者更全面地了解热像技术，本书同时介绍了温度监测和诊断技术及红外诊断技术。限于篇幅，本书在介绍温度监测和诊断技术时只讲述其概念、方法和应用。

本书的第1、2、4、5章由虞和济编写，第3章由宋利明编写，全书由虞和济主编。

编　者

1991.8.

目　录

1　温度监测技术概述 …… 1

1.1　温度与温标 …… 1

1.1.1　温度 …… 1

1.1.2　温度测量的基本原理 …… 2

1.1.3　温标 …… 2

1.1.4　1968年国际实用温标IPTS—68(1975)…… 3

1.2　温度测量 …… 6

1.2.1　温度测量方法 …… 6

1.2.2　温度计的分类 …… 8

1.2.3　温度计的选择 ……10

1.2.4　温度量值的传递 ……10

2　接触式温度监测用传感器 ……12

2.1　膨胀式温度计 ……12

2.1.1　玻璃温度计 ……12

2.1.2　双金属温度计 ……14

2.1.3　压力式温度计 ……16

2.2　电阻温度计 ……18

2.2.1　铂电阻温度计 ……18

2.2.2　热敏电阻温度计 ……22

2.3　热电温度计 ……33

2.3.1　热电偶测温原理 ……33

2.3.2　热电偶测温的基本定律 ……35

2.3.3　热电偶的种类及其特性 ……37

2.3.4　热电偶的结构和安装形式 ……54

2.3.5　热电偶的选择 ……60

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

3 非接触式温度监测用传感器 ……62
3.1 热辐射测温基本原理 ……63
3.1.1 热辐射 ……63
3.1.2 黑体辐射与发射率 ……67
3.1.3 黑体辐射定律 ……67
3.2 单色辐射温度计 ……71
3.2.1 光学高温计 ……72
3.2.2 光电高温计 ……76
3.3 辐射温度计 ……79
3.3.1 辐射温度计测温原理与分类 ……79
3.3.2 辐射温度计的结构 ……80
3.4 比色温度计 ……83
3.4.1 比色温度计测温原理与分类 ……83
3.4.2 比色温度计的结构 ……84
3.5 部分辐射温度计 ……88

4 红外监测技术 ……89
4.1 红外探测器（红外温度计）……89
4.1.1 红外探测器的特性参数 ……90
4.1.2 红外探测器的光学系统 ……91
4.1.3 光电红外探测器 ……92
4.1.4 热敏红外探测器 ……94
4.2 热像仪 ……95
4.2.1 红外成像 ……95
4.2.2 AGA782型热像仪 ……98
4.3 红外热电视 …… 117
4.3.1 红外热电视的基本原理 …… 117
4.3.2 红外热电视技术简介 …… 118

4.3.3 红外热电视的使用 …… 120

5 红外诊断技术在工程中的应用 …… 123

5.1 红外诊断技术在铁路交通中的应用 …… 123

5.1.1 红外线轴温检测技术 …… 123

5.1.2 第二代红外线轴温检测设备的研制 …… 124

5.1.3 车轴箱温度在线监测装置 …… 124

5.2 红外诊断技术在冶金工业中的应用 …… 124

5.2.1 应用红外测温技术对高炉进行监测 …… 125

5.2.2 应用红外测温技术提高钢包寿命 …… 125

5.2.3 应用红外测温技术对钢铁生产新工艺进行测试分析 …… 129

5.2.4 顶底复吹冶炼过程中转炉炉壳托圈的动态温度场热像图 …… 129

5.2.5 钢锭轧制过程中动态温度场的测定 …… 131

5.2.6 CQ超轻质帽口、DF保护渣和蛭石防缩剂“三位一体”浇钢新技术的验证 …… 131

5.3 红外诊断技术在石油化工企业中的应用 …… 134

5.3.1 热像仪用于点检 …… 134

5.3.2 在化工生产流程中的应用 …… 134

5.3.3 在石油生产中的状态监测 …… 135

5.4 红外诊断技术在电力系统中的应用 …… 135

5.4.1 电力设备的计划监测 …… 135

5.4.2 电力设备的临时监测 …… 135

5.4.3 测试方法及注意事项 …… 136

5.5 红外诊断技术在机械工业中的应用 …… 137

5.5.1 机床主轴箱热变形检测 …… 137

5.5.2 机床胶接结构热特性诊断 …… 138

5.5.3 磨削温度检测 …… 139

5.4 精密铸件内部通道的探查 …… 140

5.5.5 多层复合材料和蜂窝材料中缺陷和脱胶等的探查…… 142
5.5.6 不透明光滑金属表面的微小缺陷的显微探查…… 143
5.5.7 焊接质量的热像检查 …… 143
5.6 红外诊断技术在建筑工程中的应用 …… 143
参考文献…… 144

1 温度监测技术概述

温度是国际单位制（SI）中七个基本物理量之一，是工业生产中的重要工艺参数，它也是表征机器运行状态是否正常的一个重要指标。物体的许多物理现象和化学性质都与温度有关，很多生产工艺过程都是在一定的温度范围内进行的，因此温度和温度测量的问题是工业生产、状态监测和科学研究中人们经常遇到和要解决的问题。

人们往往以为温度测量很简单，其实要准确地测量温度是很困难的。只要有了标准量块和天平，长度和质量的测定都能得到一定准确度的测量结果，但是，温度测量却不能如此方便，无论采用准确度多么高的温度计，如果温度计的选择不当，或者测量方法不合适，均不能得到准确的测量结果。由此可见实用测温技术的重要性和复杂性。

1.1 温度与温标

1.1.1 温度

物体的冷热程度通常用温度来表示。温度虽然可以由人的感觉器官直接觉察，但这很不可靠，更难以定量判断。例如人在环境温度为5℃的室内坐久了会觉得冷，可是，一个长时间呆在冰天雪地中的人，当他突然进入此屋内，则会感到很暖和。又例如依次接触木头、泡沫塑料、铜棒，虽然它们都在室温下，但却会感到温度各不太相同。冷天乘车，人们总感到车厢里的铁把手比木把手要凉些，原因是人的体温高于铁和木头，铁传热比木头快，所以人感觉铁比木头凉。可见，凭人的感觉来判断温度的高低是不科学的，必须寻找一种客观的科学的测温方法。但是，温度测量又不能像长度测量那样直接地用长度单位来表示，温度测

量只能借助于某种物质随温度按一定规律改变的物理性质来测量。然而，迄今为止，还未找到完全满足上述要求的物质。基本上符合要求的物质及其相应的物理性质有：液体、气体的体积或压力；热电偶的热电势；金属的电阻及物体的热辐射等，这些都随温度的不同而变化，都可以作为温度测量的基础。为了分析和解决各种实际的热学测量问题，首先必须对温度建立严格的科学的定义。

1.1.2 温度测量的基本原理

假定有两个热力学系统，原来处于各自的平衡态，当这两个系统互相接触时，它们之间将发生热交换（叫热接触），实验证明，热接触后的两个系统一般都发生变化，但经过一段时间后，两个系统的状态便不再变化了，说明两个系统又达到新的平衡态。这种平衡态是两个系统在有热交换的条件下达到的，称为热平衡。

现在取三个热力学系统A、B、C进一步做实验。将B和C相互隔绝开，但使它们同时与A接触，经过一段时间后，A与B以及A与C都达到了热平衡。这时如果再将B与C接触，则发现B和C的状态都不再发生变化，说明B与C也达到了热平衡。由此可得出结论：如果两个热力学系统都分别与第三个热力学系统处于热平衡，则它们彼此间也必定处于热平衡。可见，处于同一热平衡状态的所有物体都具有某一共同的宏观性质，表征这个宏观性质的物理量就是温度。温度这个物理量仅取决于热平衡时物体内部的热运动状态。也就是说，温度是物体分子运动平均动能大小的标志，即温度高的物体，其分子平均动能大；温度低的物体，其分子平均动能小。

一切互为热平衡的物体都具有相同的温度，这是用温度计测量温度的基本原理。

1.1.3 温标

为了保证温度量值准确一致，首先要建立统一的标准，用来衡量温度的标准尺度，简称温标，温标就是温度的数值表示方

法。各种温度计的数值都是由温标决定的。在世界范围内统一的温标就是国际实用温标。

国际实用温标是一种国际协议性温标。最科学的温标是建立在热力学第二定律基础上的热力学温标，一般用气体温度计来实现热力学温标。但气体温度计装置复杂，使用不便。为此，必须找到一种与热力学温度十分接近，又要求使用方便的温标。这就出现了国际实用温标，用来统一各国间的温度量值。

最早建立的国际实用温标是在1927年第七届国际计量大会上通过并采用的温标，定名为1927年国际温标（ITS—27），以后多次修改，目前国际（包括中国）采用的是1975年第十五届国际计量大会上通过的1968年国际实用温标（1975年修订版）。

1.1.4 1968年国际实用温标（1975年修订版）IPTS—68（1975）

1.1.4.1 基本温度及其表示方法

1968年国际实用温标IPTS—68(1975)规定，以热力学温度作为基本温度，热力学温度的符号为T，单位为开尔文，开尔文的符号为K（Kelvin的第一个字母），K定义为水三相点热力学温度的1/273.16。

在1968年国际实用温标中，对摄氏度（degree Celsius）作了新定义，即热力学摄氏温度（符号为t）定义为

$$t = T - 237.15 \qquad (1\text{-}1)$$

摄氏温度的单位是摄氏度，符号为℃，20℃应读作20摄氏度。摄氏温度的数值是以273.15K为起点（$t=0$）；而热力学则以0K为起点（$T=0$），这两种温度仅是起点不同，无本质差别。在表示温度差时

$$1℃ = 1K \qquad (1\text{-}2)$$

一般在0℃以下用摄氏温度表示，在0℃以下或理论研究中，多采用热力学温度。

在某些国家中，另一种常用温度单位是华氏（Fahrenheit）温度，其单位为华氏度，符号为°F，华氏温度与摄氏温度及热力

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

学温度的换算关系分别为

$$℃=\frac{5}{9}(°F-32) \tag{1-3}$$

$$K=\frac{5}{4}(°F+459.67) \tag{1-4}$$

在表示温度差时为

$$1℃=\frac{5}{9}°F \tag{1-5}$$

例1-1 美国标准中规定S型热电偶补偿导线的使用温度范围为75～400°F，误差限为±12°F。换算成摄氏温度则分别为

$$t_{c1}=\frac{5}{9}(75-32)=24℃$$

$$t_{c2}=\frac{5}{9}(400-32)=204℃$$

误差限则为 $\frac{5}{9}\times 12=7℃$

1.1.4.2 温标的基本规定

1968年国际实用温标，是以定义固定点温度的指定值和在这些固定点上分度过的标准仪器来实现热力学温标的。各定点间的温度是根据插补公式使标准仪器的示值与国际实用温标的温度值相联系。

A 定义固定点

所谓定义固定点是利用纯物质各相间可实现的平衡状态建立起来的温度点。例如水三相点温度的指定值为0.01℃。IPTS—68(1975)温标有13个固定点，这些固定点的名称、平衡状态及其温度的指定值如表1-1所示。除了固定点外，还提供了33个参考点，其作用与固定点类似，但准确度稍低，这些参考点称为第二类参考点，在对标准仪器或高精度仪器进行分度与校验时，要应用这些固定点和第二类参考点。

表 1-1　IPTS—68定义固定点①

平　衡　状　态	国际实用温度指定值	
	T_{68}(K)	t_{68}(℃)
平衡氢固相、液相、气相间的平衡（平衡氢三相点）	13.81	−259.34
平衡氢液相、气相在33330.6Pa压力下的平衡	17.042	−256.108
平衡氢液相和气相间的平衡（平衡氢沸点）	20.29	−252.87
氖液相和气相间的平衡（氖沸点）	27.102	−246.048
氧固相、液相和气相间的平衡（氧三相点）	54.361	−218.789
氩固相、液相和气相间的平衡（氩三相点）	83.798	−189.352
氧液相和气相间的平衡（氧冷凝点）	90.188	−182.962
水固相、液相和气相间的平衡（水三相点）	273.16	0.01
水液相和气相间的平衡（水沸点）	373.15	100
锡固相和液相间的平衡（锡凝固点）	505.1181	231.9681
锌固相和液相间的平衡（锌凝固点）	692.73	419.58
银固相和液相间的平衡（银凝固点）	1235.08	961.93
金固相和液相间的平衡（金凝固点）	1337.58	1064.43

① 除各三相点和一个平衡氢点（17.042K）以外，温度的指定值均指在压强 $P_0 = 101325$Pa的平衡态。

B　标准仪器与插补公式（内插公式）

由于没有一种温度计能适用于整个国际实用温标的温度范围，因此，1968年国际实用温标分四个温区，分别采用不同的插补公式和标准仪器。

用于13.8K～630.74℃的标准仪器是铂电阻温度计。在13.8K～273.15K（0℃以下）的插补公式为

$$W(T_{68}) = W_{CCT-68}(T_{68}) + \Delta W_r(T_{68}) \qquad (1\text{-}6)$$

式中　$W(T_{68})$——电阻比，当T_{68} = 373.15K时要求$W(T_{68}) \geqslant 1.39250$；

$W_{CCT-68}(T_{68})$——标准参考函数，它表示某特定铂的电阻比与温度之间的关系；

$\Delta W_r(T_{68})$——偏差函数。

在0℃～630.74℃的插补公式为

$$t_{68} = t' + 0.045\left(\frac{t'}{100℃}\right)\left(\frac{t'}{100℃}-1\right)\left(\frac{t'}{419.58℃}-1\right)$$

$$\cdot\left(\frac{t'}{630.74℃}-1\right) \tag{1-7}$$

$$t'=\frac{1}{\alpha}[W(t')-1]+\delta\left(\frac{t'}{100}\right)\left(\frac{t'}{100}-1\right)$$

式中 t'——为计算方便而引进的中间变量；

$W(t')$——$R(t')/R(0℃)$，$R(0℃)$及α、δ，由水三相点、水沸点（或锡凝固点）和锌凝固点的电阻实测值决定。

用于630.74℃～1064.43℃的标准仪器是标准铂铑10-铂热电偶。热电偶的铂丝纯度$W(100℃)\geqslant 1.3920$，它的电动势与温度的关系为

$$E(T_{68})=a+bt_{68}+ct_{68}^{2} \tag{1-8}$$

式中 $E(T_{68})$——标准铂铑10-铂热电偶在参考温度为0℃，测量端为t_{68}时的热电势；

a、b、c——常数，由铂电阻温度计在630.755℃±0.2℃及银、金凝固点测得的热电势E值决定。

用于1064.43℃以上温域的标准仪器是基准光学高温计（或光电高温计），其插补公式为

$$\frac{L_\lambda(T_{68})}{L_\lambda[T_{68}(Au)]}=\frac{\exp\left[\dfrac{C_2}{\lambda T_{68}(Au)}\right]-1}{\exp\left[\dfrac{C_2}{\lambda T_{68}}\right]-1} \tag{1-9}$$

式中 $L_\lambda[T_{68}(Au)]$、$L_\lambda(T_{68})$——在真空中波长为λ，温度分别为$T_{68}(Au)$和T_{68}时，黑体辐射的光谱辐射亮度；

C_2——0.014388m·K，是第二辐射常数。

1.2 温度测量

1.2.1 温度测量方法

温度测量方法可分为接触法与非接触法两类。

1.2.1.1 接触法

由热平衡原理可知，当两个物体接触后，经过足够长的时间达到热平衡，则它们的温度必然相等。如果其中之一为温度计，就可以用它对另一物体实现温度测量，这种方式称为温度测量的接触法，其特点是温度计要与被测物体有良好的热接触，使两者达到热平衡。用接触法测温时，感温元件要与被测物体接触，这样往往要破坏被测物体的热平衡状态，并受到被测物质的腐蚀作用，所以，对感温元件的结构和性能要求苛刻，但这种方法测温的准确度高。

1.2.1.2 非接触法

温度计不接触被测物体，而是利用物体的热辐射能（或亮度）随温度变化的原理来测定物体的温度，这种方式称为温度测量的非接触法。其特点是不与被测物体接触，因而不改变被测物体的温度分布，由于辐射热与光速一样快，所以热惯性很小。从原理上看，用这种方法测温无上限，通常用来测定1000℃以上的

表 1-2 接触法和非接触法的特点

	接触法	非接触法
必要条件	(1) 检测元件与测量对象有良好的热接触； (2) 测量对象与检测元件接触时，要使前者的温度保持不变	(1) 由测量对象发出的辐射应全部到达检测元件； (2) 应明确知道测量对象的有效发射率或重现性
特点	(1) 测量热容量小的物体的温度有困难； (2) 测量运动物体有困难； (3) 可测量任何部位的温度； (4) 便于多点、集中测量和自动控制	(1) 因为检测元件不与测量对象接触，所以测量对象的温度不变； (2) 可以测量运动物体的温度； (3) 一般是测量表面温度
温度范围	容易测量1000℃以下的温度	适于高温测量
准确度	测量范围的1%左右	一般在10℃左右
响应速度	较慢	较快

移动、旋转或反应迅速的高温物体的温度。非接触法的测温准确度往往低于接触法。两种测温方法的特点及必要条件等 如 表1-2所示。

1.2.2 温度计的分类

1.2.2.1 温度计按测温原理分类

按测温原理对常用温度计的分类见表1-3。日本实用温 度 计的种类及特点见表1-4。

表 1-3 工业温度计的分类

测量方法	分 类 名 称		作 用 原 理
接触测量	膨胀式温度计	液体膨胀式：玻璃温度计 固体膨胀式：双金属温度计	利用液体或固体受热膨胀的性质
	压力表式温度计	液体式 气体式 蒸汽式	利用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的性质
	电阻温度计		利用导体或半导体受热电阻值变化的性质
	热电偶温度计		利用物体的热电性质
非接触测量	1.辐射高温计	单色式 全辐射式 比色式	利用物体热辐射的性质
	2.光学高温计		
	3.红外热象仪		
	4.红外热电视		
	5.红外测温仪		

1.2.2.2 温度计按准确度等级分类

可分为基准、工作基准、一等标准、二等标准及工业用等各种等级的温度计。国际上准确度最高的标准计量仪器由国际计量局保存，我国的国家基准存放在中国计量科学研究院。而各省市计量局温度标准也要定期与国家基准对比，以保证全国及各地区的温度量值的统一。

表 1-4 实用温度计的种类及特点

原理	种类		使用温度范围（℃）	量值传递的温度范围（℃）	精度（℃）	线性化	响应	记录与控制	价格
膨胀	水银温度计		−50～+650	−50～+550	0.1～2	可	一般	不适	贱
	有机液体温度计		−200～+200	−100～+200	1～4	可			
	双金属温度计		−50～+500	−50～+500	0.5～5	可	慢	适	
压力	液体压力温度计		−30～+600	−30～+600	0.5～5	可	一般	适	贱
	蒸汽压力温度计		−20～+350	−20～+350	0.5～5	非			
电阻	铂电阻温度计		−260～+1000	−260～+630	0.01～5	良	一般	适	贵
	热敏电阻温度计		−50～+350	−50～+350	0.3～5	非	快		一般
热电势	*R*	热电温度计	0～1600	0～1554	0.5～5	可	快	适	贵
	K		−200～+1200	−180～+1000	2～10	良			一般
	E		−200～+800	−180～+700	3～5				
	J		−200～+800	−180～+600	3～10				
	T		−200～+350	−180～+300	2～5				
热辐射	光学高温计		700～3000	900～2000	3～10	非		不适	一般
	光电高温计		200～3000		1～10		快	适	贵
	辐射温度计		约100～约3600		5～20		一般		
	比色温度计		180～3500		5～20		快		