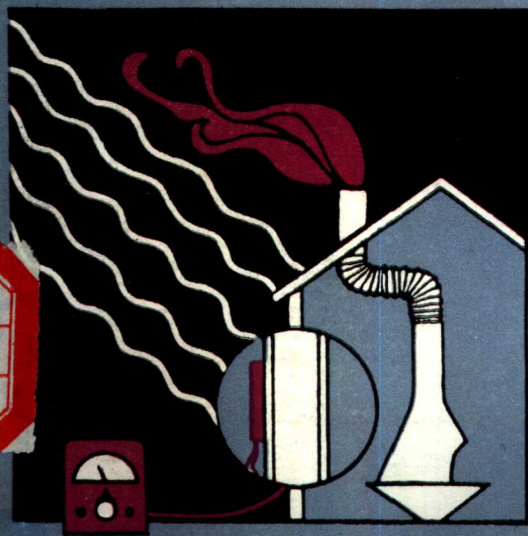


热流测量与热流计

● 戴自祝 刘震涛 韩礼钟 编著

● 计量出版社



热流测量与热流计

戴自祝 刘震涛 韩礼钟 编著

计量出版社

1986·北京

内 容 提 要

本书基于传热的基本原理,介绍各种热流测量方法的发展过程及应用情况;对目前广泛使用的热阻式热流计的原理、结构、测头的制作、标定方法以及指示仪表、误差分析等均作了详细的阐述。对流体输送过程用的热流计和辐射热流计以及其它类型的热流计也作了简要的介绍。

本书可供从事热工和能源计量测试、工业自动化仪表、环境、建筑、冶金、化工等方面的工程技术人员以及高等院校有关专业的师生阅读和参考。

热 流 测 量 与 热 流 计

戴自祝 刘延涛 韩礼钟 编著

责任编辑 窦绪昕

计量出版社出版

(北京和平里11区7号)

北京计量印刷厂印刷

书店北京发行所发行 各地新华书店经售

开本 850×1168 1/32 印张 7 1/8

字数 190 千字 印数 1—7000

1986年3月第一版 1986年3月第一次印刷

统一书号 15210·496

定价 1.70 元

序

众所周知，能源供应紧张是制约我国经济发展的一个重要因素。我国的能源供应包括积极开发水力、发展核能和太阳能等新能源的利用；但在今后相当长的一段时间内还势必以煤为主。而我国煤炭资源的分布极不平衡，北煤南运的局面仍将长期存在，这又影响着我国交通的紧张。我国的技术装备落后，多少年来不重视“能耗”，运行管理不善，造成了众多的有形、无形的浪费。与此同时，煤炭的运输、储存和燃烧也严重地污染了环境。总之，能源供应的开源节流将直接影响着我国四个现代化建设的进程。

今年将连续第六年开展“节能月”活动。节能已在我国形成舆论，也开始取得一定的实效。但我国宏观平均的能源利用率仍然很低，因此节能的潜力很大，需要摸清底细，开展各个企业以及各个用能设备的热平衡分析，以便制订节能的对策，对症下药地改善运行管理，取得经济效益。这就需要研制和推广普及计量和监测用的热流计，力求量值统一，就象已经得到公认的节电需要电表、节水需要水表一样，以便科学地统计节能的实际效果。

正是本着上述宗旨，本书作者根据他们在中国预防医学中心卫生研究所和清华大学多年来试制热流计和研究热流计应用技术所积累的经验，以简明易懂、实例启示的体裁写成初稿，又经卫生研究所张希仲教授精心校订。值此付印之际，愿志数语，算是简单的介绍。

王 补 宣

1984年7月26日于清华大学热能工程系

前 言

热传递现象（通称“传热”）是一种普遍的自然现象，广泛地发生在各种生产和生活的过程中。从建筑物、锅炉、工业窑炉、热力管道和设备，到运输车辆、船舶和航天飞机；从冶金、电力、石油、化工、机械、地热开发到农业工程和生物医学工程；从人们所穿的衣服、鞋子到人体的本身……，各个领域，凡是有温差的地方都有热传递的问题。

在某些情况下，为了阻止或限制热流就需要采取各种绝热措施，利用各种绝热保温材料；而在另一些情况下，则往往是要增强传热，这时就要采取各种加强传热的措施。例如，在建筑物中广泛采用绝热保温材料就能大大降低采暖和空调的成本，节省能源，同时也为人们提供了舒适的生活环境。在高温车间或航天飞机中，为了给工作人员或宇航员准备适当的热环境，就必须考虑各种绝热材料的性能以及传热的状况。对于各种燃烧设备，为了提高其燃烧效率，就需要研究炉内的传热和炉子结构的改进。在生物医学的研究中，对人和生物体的新陈代谢的分析也要考虑传热现象，而且从人体各部位的散热量可以分析人体内部的一些情况，有时还可以根据散热是否异常作为判断人体病变的依据之一。更有广泛意义的是在各个工业部门中的热设备、冷冻设备以及热力和制冷管道上到处都存在传热现象。为了保证工艺的要求，同时又要合理利用热能，就要分析传热状况；为了检查设备的缺陷，也要检测传热状况是否异常，以保证生产正常进行。

长久以来，人们在涉及到有关热信息的检测处理和控制时，都是通过温度这个参数来进行的。随着工业生产的发展和节约能源工作的深入开展，大家越来越深刻地感到，仅仅把温度信号作为唯一的热信息是非常不够的，因此，热流检测的理论和技术的越

来越受到重视，测量热流用的传感器——热流测头及热流计的研究和使用也更加广泛了。

七十年代以来，世界各国都感到能源短缺，开发新能源和节约能源的工作受到了普遍的重视，对节能的研究也大大加强了。很多国家制订了有关节能的法令和国家标准，也规定了检测和评价的方法，与此同时，各种检测仪表也应运而生，并且发展得很快。如作为测量热流的一种重要手段的热流计也由实验室的装置转变为现场使用的仪表，逐渐有了多种商品，有的还应用了数字显示、红外和微处理器等新技术，提高了使用性能。

我国对节能工作非常重视，已制订了若干有关节能的国家标准，企业热平衡工作也正在广泛开展，其中就包括采用热流计在内的各种计量和检测仪表。热流计在节能检测和热工计量等领域中得到了广泛的应用，同时也有一些单位在热流计的研制和改进工作中取得了一定的成果。

热流测量技术随着传热理论的深入研究和各种热流计的研制与改进而日趋成熟，现在已逐渐发展成为在传热的应用研究中一种常用的手段。传热测量是比较困难的一种工作，尤其是热流测量相对于温度测量来说，开展得晚一点，存在的问题也更多一些，人们对它还不甚熟悉。为了适应这种需要，本书的目的就是要使读者对热流测量和热流计的基本原理及使用方法有一个正确的了解，从而合理使用仪表，准确地检测热流，为分析传热状况及节能工作提供可靠的数据。

本书的主要目的，是供在环境、建筑、冶金、化工、机械、地热、石油、农业工程和生物医学工程等许多领域中需要运用热流测试技术的科研人员以及在广大的工业企业中负责能源管理和节能检测工作的工程技术人员和管理干部使用；也可供热工、计量和工业自动化仪表等方面的工程技术人员和高等学校中有关专业的师生参考。

为了兼顾各方面人员的要求，书中内容力求深入浅出，按照理论、实践以及应用举例的方法叙述，尽量避免艰深的数学推

导，大部分的章节只需高中文化程度就可以完全理解。凡在通常的传热学和热工测量等教科书中容易见到的内容，都尽量避免重复。部分章节中增加了一些实用性较强的例题，便于读者掌握和灵活应用。本书对于应用方面的问题给以充分重视，除了对应用的方法、注意事项及测试误差等作详细的阐述之外，还列举了在各个领域中应用的一些实例供读者参考，以便开扩思路，充分发挥出热流测量技术的作用。

本书从第一章传热的基本原理着手，引出了热流的概念，说明热流分析在传热应用研究中的作用。紧接着在第二章中叙述了各种热流测量方法的概况、特点、发展过程和分类。从第三章至第八章，本书以较大的篇幅详细阐述了目前广泛使用的热阻式热流计。第三章介绍了热阻式热流测头的原理、构造及制造工艺。第四章比较详细地叙述了这类热流测头的各种标定方法，并分析了各种方法的标定误差及优缺点。第五章着重分析了热阻式热流测头的性能，并提出了改善性能的方法——系数一致化和温度补偿，从而使热流测头更便于应用。第六章介绍了热阻式热流计的各种指示仪表。第七章就热阻式热流计的使用误差作了详细的分析，包括附加热阻的误差、测头的时间响应以及对流和辐射引起的误差。第八章则以较多的篇幅详细阐述了应用方面的问题，分析了热阻式热流计在直接测量热流、测量导热系数和作为控制和监测元件方面应用的各个问题，并列举了典型实例。第九章介绍了流体输送过程用的热流计，包括热水和蒸汽热流计，介绍了这两类热流计的原理、误差、标定以及应用上的一些情况。第十章介绍了辐射式热流计，包括纯辐射热流计、总热流计及其它类型的辐射热流计，也对这类热流计在使用中的若干问题作了探讨。第十一章对利用瞬态传热等原理的其它类型热流计以及红外热像技术用于热流测量等内容作了简要的介绍。

本书统一采用国际单位制（SI制），但考虑到目前国内在工程中还经常使用工程单位制，因此为了便于读者使用，在本书中也介绍了工程制单位，并在附录中列出单位换算表。

本书在编写过程中参考了国内外大量的有关文献资料，也介绍了作者所在单位近年来在这方面所做的工作，为了叙述的方便并节省篇幅，书后仅列出最主要的一些参考文献。

本书在编写过程中，曾经得到作者所在单位的同事们和兄弟单位的许多同行的热情鼓励和支持，也得到了计量出版社编辑同志的帮助和协作。中国预防医学中心卫生研究所张希仲研究员审阅了本书的全文，并提出了宝贵的意见。又承蒙清华大学热能工程系王补宣教授为本书撰写了序言。在此我们向他们表示诚挚的谢意。

本书涉及的内容较为广泛，由于作者水平有限，缺点和谬误在所难免，恳切地希望读者批评指正以便今后修改时参考。

目 录

第一章 传热原理	(1)
一、热传递	(1)
二、导热的基本定律	(1)
三、导热系数	(6)
四、导热基本定律的应用示例	(10)
1. 导热基本定律应用于多层平壁计算.....	(11)
2. 导热基本定律应用于管道保温的计算.....	(13)
五、对流热传递	(17)
六、热辐射的基本概念.....	(21)
1. 辐射基本定律.....	(22)
2. 四次方定律.....	(24)
3. 黑度与吸收率之间的关系.....	(25)
七、辐射基本定律的应用	(26)
第二章 热流测量概述	(29)
一、温度与热流的关系及区别	(29)
1. 温标及温度场的概念.....	(29)
2. 温度梯度和热流.....	(30)
3. 温度与热流的关系.....	(30)
二、热流测量的特点	(33)
三、热流测量技术的发展	(34)
四、热流计的分类	(37)
第三章 热阻式热流测头	(40)
一、热阻式热流测头概述	(40)
二、热阻式热流测头的原理	(44)
三、热阻式热流测头的结构及制作	(51)
1. 板式测头的制作	(52)
2. 可挠式测头的制作	(57)

四、热阻式热流测头的性能	(57)
第四章 热阻式热流测头的标定	(59)
一、标定的物理基础	(59)
二、绝对法——保护热板法	(60)
1. 工作原理	(60)
2. 仪器构造	(62)
3. 标定热流测头	(66)
三、其它绝对法	(69)
1. 单试样保护圈式导热仪标定热流测头	(69)
2. 溶加热器法	(71)
3. “日本昭和法”	(71)
四、比较法	(72)
五、特殊方法	(74)
六、标定误差分析	(75)
第五章 热阻式热流测头的性能及其改善	(79)
一、热流测头的性能	(79)
二、热流测头系数的一致化和温度补偿	(80)
1. 热流测头系数的一致化	(81)
2. 热流测头系数的温度补偿	(84)
3. 补偿电阻的变化对性能的影响	(82)
第六章 热阻式热流计指示仪表	(94)
一、热流的指示方式	(94)
二、指针式热流指示仪表	(95)
三、数字显示式仪表	(98)
1. 前置放大部分	(99)
2. 数字显示部分	(100)
3. 测温部分	(102)
四、带微处理器的热流计	(104)
五、与其它检测仪表配合应用	(105)
第七章 热阻式热流计使用误差分析	(107)
一、热阻引起的误差	(107)
二、热阻式热流测头的响应	(110)

三、对流和辐射引起的误差.....	(115)
第八章 热阻式热流计的应用	(118)
一、直接测量热流.....	(118)
1. 几种测试方法的比较.....	(118)
2. 热流计的适用性.....	(122)
3. 测头的安装位置.....	(122)
4. 环境条件变化的影响.....	(123)
5. 测试注意事项.....	(124)
6. 现场测试材料的热阻或导热系数.....	(125)
二、热流计法测量导热系数.....	(125)
1. 测试原理.....	(126)
2. 仪器的结构.....	(127)
3. 双热流计结构.....	(129)
4. 误差分析及估算.....	(131)
5. 直读式导热仪.....	(132)
三、其它方面的应用.....	(133)
1. 热流测头作控制元件.....	(133)
2. 热流测头作监测元件.....	(134)
四、应用的典型实例.....	(134)
1. 实测设备的散热量.....	(134)
2. 快速寻找最大热损点并测出该点散热损失.....	(135)
3. 比较和评价在不同条件下的散热量.....	(136)
4. 求取经济保温层厚度.....	(138)
5. 复杂条件下保温管道散热损失的测定.....	(138)
6. 用于简单的过程控制.....	(139)
7. 用于设备的运行监督.....	(140)
8. 根据 $t-q$ 图对热力设备进行日常管理.....	(141)
9. 农业科学方面的应用.....	(143)
10. 生物学方面的应用.....	(145)
五、现场测试的组织 and 结果实例.....	(148)
1. 测试前的准备工作.....	(148)
2. 测试结果.....	(149)

8. 现场测试影响的分析.....	(151)
-------------------	-------

第九章 流体输送过程用热流计.....(155)

一、热水热流计.....(155)

1. 热水热流计的基本原理.....	(157)
--------------------	-------

2. 误差分析.....	(160)
--------------	-------

3. 电路原理方块图.....	(161)
-----------------	-------

4. 热水热流计的刻度和校验.....	(162)
---------------------	-------

5. 热水热流检测系统.....	(166)
------------------	-------

6. 使用中的几个重要问题.....	(167)
--------------------	-------

7. 其它类型的热水热量计简介.....	(170)
----------------------	-------

二、蒸气热流计.....(173)

1. 工作原理.....	(173)
--------------	-------

2. 校验及使用.....	(176)
---------------	-------

3. 微机化饱和水蒸气流量、热流积算仪.....	(179)
--------------------------	-------

第十章 辐射式热流计.....(181)

一、纯辐射热流计.....(181)

1. 2π 辐射计.....	(181)
--------------------	-------

2. 带有单晶硅片结构的纯辐射热流计.....	(183)
-------------------------	-------

二、总热流计.....(185)

1. 工作原理.....	(185)
--------------	-------

2. 固定式总热流计.....	(186)
-----------------	-------

三、辐射热流计在使用中若干问题的探讨.....(188)

1. 关于在高温条件下使用的问题.....	(188)
-----------------------	-------

2. 炉内工作条件.....	(189)
----------------	-------

3. 关于热流计表面温度改变的问题.....	(189)
------------------------	-------

4. 探测器受热面的黑度系数问题.....	(190)
-----------------------	-------

5. 关于热流计表面灰层对黑度系数的影响.....	(190)
---------------------------	-------

6. 关于单晶硅片的几个问题.....	(192)
---------------------	-------

7. 测量仪器的影响.....	(193)
-----------------	-------

四、典型标定方法.....(193)

1. 银板法.....	(193)
-------------	-------

2. 黑体炉法.....	(196)
--------------	-------

3. 有关的几个问题	(198)
五、其它类型的辐射式热流计	(199)
六、太阳辐射热的测量	(202)
第十一章 其它类型热流计简介	(204)
一、利用瞬态传热原理的热流测头	(204)
1. 块状热流测头	(204)
2. 薄片状测头	(205)
3. 薄膜状测头	(206)
二、利用流体流动或物质融化潜热的热流测头	(207)
1. 热量型热流计	(207)
2. 利用融化潜热的热流计	(208)
三、利用Nernst效应的热流测头	(209)
四、补偿型热流计	(210)
五、红外技术的应用	(210)
附录：传热方面的换算因子	(213)
主要参考文献	(214)

第一章 传 热 原 理

一、热 传 递

凡有温差存在的地方，就有热量转移的现象发生，这种热量的转移是由温度高的地区转移到温度低的地区。由于在自然界和生产过程中，温差是普遍存在的，因此热量的转移也就成为自然界和生产过程中普遍存在的现象，我们把它叫做“热量传递”或简称“传热”。

从一个烧砖的窑炉来看，炉内高温烟气把炉内的砖坯加热到一定温度，然后再经过一定的工艺流程，便可得到高质量的砖。而窑炉内的高温烟气除了加热砖坯外其热量通过墙体最内层的耐火砖，到普通的保温砖层、红砖层，一直传到墙体外的空气。这就是传热过程的基本实例。

热量的传递可以三种不同类型的方式进行。一类是固体内部的热量传递；另一类是固体表面与流体间的热量传递；第三类是物体表面与不直接接触的周围物体间的热量传递。长期以来的生产实践，使人们从现象到本质，逐步掌握了热量传递现象的科学知识，发现这三类方式有着不同的规律。通常把第一类热量传递方式叫做“热传导”或简称“导热”；第二类方式叫做“对流换热”或简称“放热”；第三类方式叫做“辐射换热”。

二、导热的基本定律

“导热”是指物体各部分（或不同物质）直接接触而发生能量的传播现象。物质各部分具有不同温度（或有不同温度的几种物质直接接触时），就会发生热量从温度较高地区向温度较低地区转移。使各处温度在没有外界热源和冷源的干扰情况下逐步趋向

均匀化。

这种不依赖各部分物质的相对位移，而能传播热量的现象，是物质的本性，叫做“导热”。如果追根求源，它是由物质内部（或物质的接触处）的分子，原子或自由电子等微粒的不规则运动（如扩散碰撞或弹性波和晶格振动）所引起的，高温微粒具有较大的动能，而低温微粒具有较小的动能，两者碰撞的结果引起能量的转移，即温度较高的微粒把能量传给温度较低的微粒，因而使热量从高温区传向了低温区。

在液体和气体中当各处温度不一致时，通常在发生导热的时候，由于各部分间密度的差异而出现对流，因此不易观察到单纯的导热现象。在固体中热量的传递则完全取决于导热。

为了说明导热的基本规律，这里先假设一个很大的单层炉墙的导热，如图 1-1。内表面温度 t_1 总高于外表面温度 t_2 ，而且 t_1 和 t_2 都是不随时间变化的稳定温度。实验表明：通过炉墙向外传出的热流量 Q [W] 必定与温度差 $(t_1 - t_2)$ [°C] 或 [K]，和炉墙面积成正比，而与炉墙厚度成反比。实验还表明在同样大小的温度差 $(t_1 - t_2)$ ，面积 F [m²] 和厚度 δ [m] 的情况下，炉墙传出的热流量 Q 还和炉墙的材料有关。对于这种平面炉墙，可以写成下列等式：

$$Q = \lambda \frac{t_1 - t_2}{\delta} F \quad [\text{W}] \quad (1-1)$$

式中引入的比例系数 λ 叫做“导热系数”，它表示炉墙材料的导热能力。单位是 [W/m·K]，工程单位是 [kcal/m·h·°C]

例：有一保温炉墙厚 200 [mm]，内外表面各维持 850°C 和 50°C，试求通过表面积为 10 [m²] 保温炉墙的热流量，以及壁厚内 a 、 b 、 c …（各点相距 20 [mm]）各平面的温度。已知保温炉墙导热系数为 0.1 [W/m·K]

解：（1）热流量可以根据式（1-1）求得：

$$Q = \lambda \frac{t_1 - t_2}{\delta} \cdot F = 0.1 \frac{850 - 50}{0.2} \cdot 10 = 4000 [\text{W}]$$

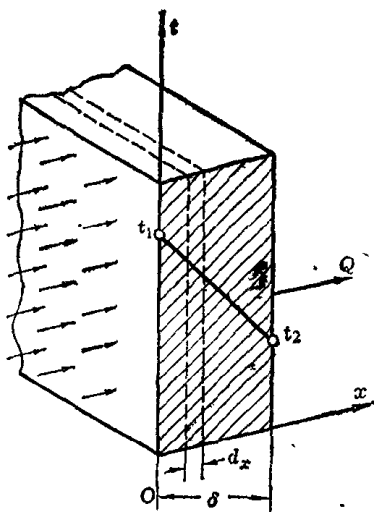


图 1-1 单层大平壁稳定导热

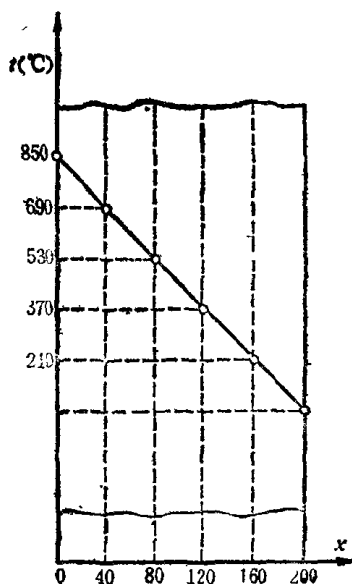


图 1-2 平壁内温度分布图

(2) 在已知 Q 的情况下求各点温度，可把式 (1-1) 改写为：

$$t_x = t_1 - \frac{Q}{\lambda F} \cdot x \quad (1-2)$$

分别以 $x = 0.04, 0.08, 0.12, 0.16, 0.20$ [m] 代入式 (1-2) 即

可求出各点温度。即 $t_a = t_1 - \frac{Q}{\lambda \cdot F} \cdot x = 850 - \frac{4000}{0.1 \cdot 10} \cdot 0.04 =$

690°C ；同理可以求出 $t_b = 530^\circ\text{C}$ ； $t_c = 370^\circ\text{C}$ ……。如果把上述各点的温度按比例画在 $t-x$ 坐标图上（纵坐标表示温度，横坐标表示尺寸）则在壁内的温度分布成一条直线。（见图1-2）

从上例的分析有助于了解以下几个基本概念。

(1) 例中平壁内，各 x 点处的温度是不同的，而且不随时间而变化，这样的导热过程叫做“稳定导热过程”。如果壁内各点温度随时间而变化，则叫做“不稳定导热过程”，例如各种工业炉的启动及停炉过程即属于后者。

(2) 例中平壁内的温度只在 x 方向有变化, 而其余二个方向 (y, z 方向) 均无变化, 所以叫做“一维空间导热”, 它具有最简单的形式, 即 $t = f(x)$ 。如果温度沿 y 和 z 方向发生变化, 或沿 x, y, z 方向均发生变化, 它的数学形式分别为 $t = f(y, z)$ 和 $t = f(x, y, z)$, 此时称为二维或三维导热。

(3) 本例平壁的两侧表面温度都各自是一个“等温面”, 即炉墙内外壁面任何点的温度都分别是 t_1 和 t_2 。而且距内表面 x 距离处的平面 (如 $a, b, c \dots$ 诸平面), 也各都是等温面、平面上的温度都各相同, 具体数值如图 (1-2) 上所示。

因为空间内同一点不可能同时具有两个不同的温度, 所以温度不等的等温面绝不会彼此相交。在本例中各等温面都是互相平行的。

在每一个等温面上, 既然不存在温度差, 导热也就不可能沿着等温面进行, 而是永远沿着等温面“法线”方向 (即垂直于等温面的方向) 朝温度低的一边进行。显然, 上例中导热只能沿着与壁面垂直的 x 方向进行。

(4) 例中温度沿炉壁 x 方向的变化呈直线规律, 每隔 20 [mm], 温度变化 80°C , 即温度变化率 $\frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{80}{0.02} = 4000 [^\circ\text{C}/\text{m}]$, 也就是说每米距离内温度变化为 4000°C , 而且在整个炉墙的内部这种温度变化率到处一样, 为一常数关系, 即:

$$\frac{t_1 - t_a}{x_1} = \frac{t_1 - t_b}{x_2} = \frac{t_1 - t_c}{x_3} = \dots = 4000 [^\circ\text{C}/\text{m}]$$

这种温度变化, 在图 1-2 中成为一倾斜的直线, 它的斜率就是温度的变化率。

必须指出, 上述例子只是导热问题中的一个特例。如果在整个墙壁的范围内, 温度变化率 $\frac{\Delta t}{\Delta x}$ 不是一个常量, 也就是说墙内温度分布线不是直线而是一种曲线, 则温度分布线的斜率各处都