

编号

南京航空航天大学

毕业论文

航空发动机光谱诊断界限值的制定

学生姓名

张峰

学 号

070630228

学院

民航学院

专 业

民航机务工程

班 级

0706302

指导教师

陈果 教授

二〇一〇年六月

南京航空航天大学

本科毕业设计（论文）诚信承诺书

本人郑重声明：所呈交的毕业设计（论文）（题目：航空发动机光谱诊断界限值的制定）是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的成果。尽本人所知，除了毕业设计（论文）中特别加以标注引用的内容外，本毕业设计（论文）不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。

作者签名：

年 月 日

（学号）：

航空发动机光谱诊断界限值的制定

摘 要

光谱分析技术操作简便、快捷，是发动机磨损状态监测与故障诊断行之有效的主要手段。实践证明，光谱诊断界限值的制定可提高发动机磨损状态的识别率，是发动机磨损状态监测的理想方法。在本文中，开发了一种基于 MATLAB 实现光谱诊断界限值的制定的软件。

论文介绍了光谱分析的仪器和原理，尤其详述了界限值的制定理论，介绍了 3 种制定界限值的模型及其优缺点。

论文研究了界限值制定的数学模型，总结了界限值的类别及模糊性。并以此为基础，基于 MATLAB 平台，实现 3 种仿真算法制定界限值，分别是基于 Kn-近邻算法概率密度函数估计的界限值制定、基于 Parzen 窗算法概率密度函数估计的界限值制定和基于 SVM 算法概率密度函数估计的界限值制定。为论证软件的正确性，利用随机生成的已知概率分布的数据导入软件，观察拟合的分布与已知分布的拟合情况。

最后，将实际数据导入软件，比较各界限值制定方法，选取一种比较理想的方法应用到实际中。

关键字：油液分析，界限值，故障诊断

Threshold Value for Aircraft Engine Spectral Diagnosis

Abstract

Because the operation of spectrum analysis technology is simple and fast, it is an important method of engine wear condition monitoring. A group of practice shows that boundaries of value for spectral diagnosis can heighten the recognizing correctness, and it is an ideal method of engine wear condition monitoring. In this paper, develop a soft which can generate boundaries of value for Aircraft engine spectral diagnosis based on MATLAB.

In this paper which introduced spectral diagnosis' instruments and principles, especially on the theory of spectral diagnosis.

Paper studies threshold value of the mathematical models, a summary of the class and blurred the threshold values. And underlying asset, based on platform of MATLAB, achieve three simulation algorithm to generate threshold value of spectral diagnosis, they respectively are estimation probability density function of threshold value based on Kn algorithm, estimation probability density function of threshold value based on Parzen algorithm and estimation probability density function of threshold value based on SVM algorithm. In order to verification the correctness of the software, utilize random data which probability distribution is given load in software, to see the different between scatter with kernel fit and given probability distribution.

At last, take actual data import software, the comparison and discussion of several methods of generation threshold value, choose a more ideal way to the practical application.

Key words: oil analysis, threshold value, fault diagnosis

目 录

航空发动机光谱诊断界限值的制定	i
摘 要	i
第一章 绪论	- 1 -
1.1 选题背景及意义	- 1 -
1.2 光谱诊断研究的现状	- 2 -
1.3 界限值制定的现状	- 4 -
1.4 本论文的主要研究内容	- 5 -
第二章 光谱分析方法简介	- 6 -
2.1 光谱分析原理及仪器简介	- 6 -
2.1.1 光谱分析原理	- 6 -
2.1.2 仪器简介	- 7 -
2.2 光谱分析的数学方法	- 8 -
2.3 磨损元素界限值的制定方法	- 9 -
2.3.1 界限值类别及模糊性	- 9 -
2.3.2 界限值的制定理论	- 11 -
第三章 基于概率密度估计的界限值制定方法概述	- 14 -
3.1 传统方法的局限性	- 14 -
3.2 界限值制定的新方法	- 14 -
3.2.1 基于 Kn-近邻概率密度函数估计的界限值制定	- 15 -
3.2.2 基于 Parzen 窗概率密度函数估计的界限值制定	- 17 -
3.2.3 基于支持向量机的概率密度函数估计	- 21 -
第四章 基于 MATLAB 光谱诊断界限值软件平台开发	- 25 -
4.1 系统简介	- 25 -
4.1.1 流程图	- 25 -
4.1.2 界面图	- 26 -
4.2 结果分析	- 27 -
4.2.1 Kn-近邻的航空发动机界限值分析	- 30 -
4.2.2 Parzen 窗的航空发动机界限值分析	- 35 -
4.2.3 SVM 的航空发动机界限值分析	- 41 -
第五章 结论与展望	- 1 -
5.1 结论	- 1 -

5.2 发展与展望	- 1 -
参考文献	- 2 -
致谢	- 3 -
附录	- 4 -

第一章 绪论

1.1 选题背景及意义

随着现代工业的发展，机械设备日趋大型化、高速化、自动化和智能化，在装备功能完善的同时，其结构也更加复杂，因而，装备发生故障和失效的潜在可能性越来越大，这些故障或失效造成的损失更为严重。对于这些装备如果不能做到良好的功能监测和故障诊断，产品就不能发挥应有的效益。因此，对现代化的装备进行有效的功能监测和故障诊断日益受到人们的重视。

根据统计，断裂、腐蚀和磨损时机械装备失效的三种主要形式。其中，以磨损最为常见。有关资料表明：60%~80%的机械装备损坏是由各种形式的磨损引起的。因此，机械装备的磨损故障诊断在整个机械装备故障诊断领域占有极其重要的位置。油液分析检测技术是装备磨损状态监测和故障诊断中一种十分有效的技术方法，它主要是通过分析被监测设备润滑油的性能变化和其携带磨损颗粒的信息，来获得机械设备摩擦学系统的润滑和磨损状态，对于保障装备可靠运行及人身安全有着重要意义。因此，世界各国对此都十分重视，多年来一直投入大量的人力和财力进行研究。迄今为止，油液分析技术作为一种有效的状态监测手段已经广泛地应用于航空、铁路、矿山、舰船和国防等部门。

美军在 20 世纪就成立了三军联合油液分析机构 JOPA(Joint Oil Analysis Program)，JOPA 的主要任务是研究开发油液分析设备，提出军用装备油液分析标准和实施规范。联合油液分析计划的执行，为美军军种之间实现了联合保障，促进了信息的交流，美国国防部认为油液分析的经济效益比可达到 1:11。2001 年 11 月，北约集团颁布了油液光谱分析计划 SOAP (Spectrographic Oil Analysis Program)，开始在其军种内实施油液分析。我国从 20 世纪 70 年代末才开始开展油液分析工作。油液分析技术作为一种有效的状态监测手段已广泛的应用于各个部门，并成立了各具特色的油液分析实验室，针对不同的装备开展了一系列的研究，取得了良好的经济、军事和社会效益。

航空发动机结构复杂，转动部件的磨损是一个非线性、多故障的过程。在故障诊断过程中，发动机磨损元素界限值是判断发动机是否产生磨损故障的重要依据，可预报发动机因磨损引起的故障，消除故障隐患。

1.2 光谱诊断研究的现状

我国从 20 世纪 80 年代才开始从事油液技术分析工作。当时主要针对飞机发动机以及液压系统和铁路内燃机车进行油液监控。虽然我国的油液监控工作起步较晚，但发展很快。清华大学、北京理工大学、上海交通大学、西安交通大学、大连海事大学、军械工程学院等高校先后对油液光谱分析的理论与实际工程应用进行了研究。

1999 年，海军和西安交通大学联合开展舰船装备船舶发动机的磨损状态监测研究，建立了一套海军舰船装备通用的油液监测分析软件系统。该系统集成了油液分析方法的知识、信息和相应的推理判断功能的专家系统，应用了三级信息融合技术（数据级、特征级、决策级），提出了基于模糊推理综合决策树的磨粒识别方法，并实现了铁谱磨粒图像的计算机自动识别。目前，有关油液监控的研究工作主要集中在油液分析数据数学分析模型的建立、预测模型的建立、故障诊断方法的建立、磨损颗粒的计算机自动识别以及故障诊断专家系统的研究开发等几个方面。

所以，至今为止，油液监控技术作为一种有效的状态监测手段在我国已广泛地应用于航空、铁路、矿山、石化、舰船和陆、海、空三军等部门中，我国已拥有一支技术、科研、管理力量雄厚的队伍，并成立了各具特色的油液分析实验室，颁布了一系列油液分析标准，取得了较好的经济、军事和社会效益。

虽然经过多年的研究和时间，我国在油液分析方面取得了一系列科研成果，但是，无论在技术上还是在管理上，与国外相比还存在一定的差距。综合国内外的油液分析应用现状可以发现，虽然油液分析技术最早应用于内燃机车的磨损检测，但是由于其在保证设备安全运行和大幅度降低设备维修费用方面取得的巨大成功，使得油液分析技术的应用领域从企业到工业和军事部门，并且还在不断扩大。表 1.1 详细列出了油液监控技术在不同领域的应用情况。

表 1.1 油液监控分析技术应用情况

应用场合	监测的具体设备和对象
飞机	发动机、液压系统、传动系统
船舶	柴油机、液压系统、传动系统、起重设备
机车	柴油机、液压系统、传动系统
车辆	发动机、液压系统、传动系统

应用场合	监测的具体设备和对象
冶金	轧钢机、起重运输设备、传动设备
石化	压缩机、柴油机、发电机、鼓风机
机床	加工中心、液压系统、传动装置
发电	燃气轮机、蒸汽轮机、液压系统、燃油质量控制
军事	发动机、润滑油质量监控、液压系统、雷达系统

目前，油液分析技术已经包括光谱分析技术、铁谱分析技术、红外分析技术、颗粒计数分析技术和润滑油理化性能测试计数等几个分支。这些分析技术有着自身的特点和应用范围：光谱分析技术分析速度快，定量分析精度高；铁谱分析技术重在磨损产生机理的分析；红外分析技术可以较全面地分析润滑油的各种性能指标，对设备的视情换油具有很强的指导作用；颗粒计数分析对液压系统的污染监测较为实用；而润滑油理化性能测试主要分析其常规的理化指标等，这些分析技术之间既相互区别有相互联系。尤其对于大型复杂机械装备，仅仅凭借某种单一的分析技术和方法很难取得满意的检测结果，因此，研究联合多种分析技术及多传感器信息融合的油液分析诊断方法是机械装备油液监测的发展趋势。

光谱分析技术原应用于分析化学，但很快就应用于测定机器润滑油中所含各种微粒的浓度，光谱分析通常分为原子发射光谱分析和原子吸收光谱分析。原子发射光谱是利用原子在外界能量作用下，由于其核外电子的能级跃迁而发射出不同特征谱线的原理，对油液中微粒进行定量分析；原子吸收光谱是利用原子对具有一定特征谱线光的吸收来测量油中微粒的含量前者一次可以同时分析出 30 种不同元素的浓度值，而后者一次只能分析出一种元素的浓度，显然，发射光谱的效率要高于吸收光谱，二者的分析精度都能达到 10^{-6} （ppm）级（百万分之一）。光谱分析方法速度快，精度高，但是只能分析出润滑油中颗粒尺寸较小的磨粒，通常颗粒直径小于 10um，而且不能得到磨损颗粒的形态特征等重要信息。

油液光谱分析技术是机械设备故障诊断、状态监测中应用最早最成功的现代技术之一。光谱分析技术可以有效地监测机械设备润滑系统中润滑油所含磨损颗粒的成分及其含量的变化。同时也可以准确地检测润滑油中添加剂的状况以及润滑油污染度变质的程度。因此，油液分析的光谱技术已成为监测机械设备状态最重要的方法之一。

1.3 界限值制定的现状

对于大中型、精密、复杂、昂贵、安全性要求高的机械设备或装备，利用油液（包括润滑和液压油）分析对磨损类故障诊断是非常有效的手段，这已为世界各国实践所证实

界限值亦称门槛值或阈值。在油液中包含多种磨损金属元素的故障信息，对每种元素必须科学的制定其界限值，才能预报机器的故障或油品的衰变状态。用户购置了多种仪器，如不根据机器特点去研究和制定各种界限值，就难以发挥仪器的功能和诊断效果。界限值没有通用性，尽管相同的仪器和相同的油品，而不同种类机器的界限值不同，因为其磨损情况、载荷、运行工况及环境条件不同。

界限值是为了保证发动机安全运行，或者对于有无故障征兆提供预报性信息的参数。是根据统计学、置信度函数的确定方法和在实际中的运用经验来制定的。概率论与数理统计是研究随机现象规律的有效工具。概率论是根据大量同类随即现象的统计规律，对随机现象出现的某一结果的可能性概率，做出客观的科学定义，对各种可能性出现大小做出数量上的描述，比较它们的大小，研究它们之间的关系。而以概率论为基础的数理统计，是研究随即现象数据的整理、分析和推断，确定应有的定量值。

油液分析是个随即现象，多个油样分析结果，理由概率论和数理统计，可以确定正常、临界和异常的界限值，配以置信度的设置，估计可能出现的概率。由于机械装备的磨损是一个复杂、随机、动态变化的过程，要对装备的磨损状态做出正确的诊断，必须在了解装备磨损状况的基础上，研究一套行之有效的光谱油液分析故障诊断的数学理论和方法。油液光谱分析主要有诊断物理和诊断数学两方面的内容，诊断数学是其中相对薄弱的一个环节。诊断数学的任务在：

- ① 描述，即用数学语言描述诊断对象的技术状态
- ② 识别，准确地识别装备的技术状态，有无故障和故障发生的部位
- ③ 寻因，从故障现象寻找故障原因，以便排除和预防。
- ④ 预测，预测故障发展后果以及相应的时间历程，包括状态预测和事件预测等。

在油液分析诊断方面，应用可定量分析的原子发射光谱仪已有 50 多年的历史，经不断改进，在体积、重量上显著减小，功能、性能指标和操作软件的方便性上有很大提高，至今仍为世界各国为预报机器磨损类早期故障征兆而广泛采用。

1.4 本论文的主要研究内容

①. 总结航空发动机光谱诊断界限值类别及性质；

从工程应用角度看，发动机磨损状态可分为正常磨损状态、警戒磨损状态、异常磨损状态 3 个评估等级。其中发动机磨损状态分为正常磨损状态时，发动机运行工况良好，正常监测即可，对应正常的界限值；当为警告磨损状态时，表明发动机可正常运行，但使用人员应引起注意，适当对发动机进行保养，同时增加监测密度，对应警告界限值；当属异常磨损状态时，发动机应停止使用，拆检维修，对应异常界限值。

②总结光谱诊断界限值制定的各种方法；

油液分析光谱数据的方法主要有 3 种：一种是建立浓度模型，通过光谱仪测得的元素浓度值对设备的磨损状态进行评价；另一种是梯度模型，针对单位时间或行驶里程的浓度的增长量来反映设备的磨损程度和趋势变化。还有一种比例模型，其建立思想就是依据两元素光谱数据之间的比例关系对两种元素磨损状态做出判断，主要包括浓度比例和梯度比例两个方面。制定界限值的方法主要有：SVM 法、Parzen 窗法和 Kn-近邻法。

③学习 MATLAB 软件，将各界限值制定方法用 MATLAB 仿真实现；

实现 SVM、Parzen 窗法和 Kn-近邻法估计概率密度，制定界限值。

比较各界限值制定方法，选取一种比较理想的方法应用到实际中去。

第二章 光谱分析方法简介

2.1 光谱分析原理及仪器简介

2.1.1 光谱分析原理

物质的原子时有原子核和在一定轨道上绕原子核旋转的核外电子组成的，正常情况下，原子核的正电荷与电子的负电荷是相等的，原子处于稳定状态。原子核外的电子在不同的能级轨道上做高速旋转运动，当有外来能量施加到原子上时，核外电子便能吸收能量从低能级跳跃到高能级的轨道上，此时，原子的能量状态是不稳定的。电子会自动由高能级跳回到低能级，同时以发射光子的形式把它吸收的能量辐射出去，所辐射的能量与光子的频率成正比关系

$$E = h\nu \quad (2.1)$$

式中 h ：普朗克常数，J/K；

ν ：发射光子的频率，Hz；

由于不同元素原子所发射光子的频率是不相同的，而频率与波长之间是一一对应关系，所以不同元素的原子所释放出来的光子波长也是不一样的。下表 2.1 为部分元素的原子所释放光子的波长。

表 2.1 元素的原子所释放光子的波长

元素	波长 $\lambda / 10^{-10} m$	元素	波长 $\lambda / 10^{-10} m$
Cu	3247	Sn	2354
Fe	3270	Al	3092
Cr	3579	Na	5890
Pb	2333	Ag	3281
Ni	3415	Mg	2852

油液光谱分析仪就是利用油样中所含金属元素原子发射不同特征波长的谱线来进行金属元素的定性和定量分析的。常用的光谱分析仪有原子吸收光谱仪和原子发射光谱仪。

2.1.2 仪器简介

常用的光谱分析仪有原子吸收光谱仪和原子发射光谱仪。

油液光谱分析是一种利用原子吸收或发射光谱来分析润滑油中金属的成分和含量，从而判断磨损的零件和磨损严重程度的方法，适合于诊断轴瓦烧损、拉缸、冷却液泄露等典型的磨损类和泄漏类故障

①原子吸收光谱仪

原子吸收光谱法通常称为原子吸收分光光度法。它是利用原子对一定特征光的吸收而进行的一种相对测量法。

空心阴极灯由所需要分析的元素制成，点燃时发出一束具有待测元素特征的入射光，当空心阴极灯辐射穿过火焰时，就被相应的元素原子所吸收，其吸收量与样品中该元素浓度成正比。光学系统是由分光器和出射狭缝组成，只用特定的谱线才能透过并照射到光电倍增管上，光电倍增管将光信号转化为电信号，经过对电信号放大和处理，就得到油样中相应元素的相对含量，通常单位以 10^{-10} (ppm)计。

原子吸收光谱分析法的优点是精度高，不受外界环境的干扰。较早的原子吸收光谱仪一次只能分析一种或几种元素，而且油样需要预先处理，分析周期较长。目前采用将油液直接送入燃烧器的方法，免除了油样处理的程序，缩短了分析时间。

②原子发射光谱仪

原子发射光谱仪是依据油样中不同原子的核外电子能级跃迁所产生的不同特征的谱线来研究其化学成分和含量的。仪器中作为激发能量的是高压电火花，原子受到激发后，会发出不同波长的辐射光线，光线从入口狭缝射到光栅上，光线在光栅上衍射，分散成不同波长的单色光。这些光沿着不同方向反射，经过出射狭缝照射到光电倍增管上，使光信号转变成为电信号，光束的强度正比于金属含量。电信号经过放大处理，将结果输入到仪器的显示单元，就可以得到不同元素的含量。原子发射光谱分析法的特点是可以利用较少的润滑油样快速地测得多种元素的含量，通常在 30s 就可以分析出 20~30 种元素及含量，而且油样不需要做预先处理，这对于机械装备的状态监测是非常有益的。

原子发射光谱仪（MOA）该仪器能快速、准确检测油液中不同磨损金属元素、添加剂元素的含量（ $\mu\text{g}/\text{ml}$ ），可以分析 21 种元素的含量；能根据各摩擦副的材质和主要组成元素种类

及相应的界限值（浓度界限值和趋势界限值），初步判断有无故障征兆及故障程度和部位；能根据添加剂的含量判断油液的使用潜力。

2.2 光谱分析的数学方法

装备的油液光谱分析数据中蕴含着丰富的信息，这些信息与装备的状态密切相关，如何把这些信息正确、全面地提取出来，对装备的磨损状态做出正确的诊断，是光谱诊断方法所要解决的问题。

对光谱分析数据的处理包括以下几个方面：

- ①每种磨损元素浓度值大小的评价。浓度值的大小与装备中某种摩擦副磨损量的多少有直接的关系，因此浓度值是评价装备之磨损状态的一个重要参考因素，通常用该型号装备的浓度界限值对分析油样的浓度值进行评价。
- ②磨损元素的浓度值随装备运行时间或行驶里程变化，相邻两次取样间隔的单位时间或行驶里程内的浓度变化量称为梯度，它表示装备中某种摩擦副的磨损率，是反映装备磨损程度和趋势的重要指标。通常用梯度界限对分析油样的梯度值进行评价。
- ③应用油液分析数据提供的信息，进行浓度信息和梯度信息的综合评价，从而对装备所处的磨损状态进行更准确的判断。
- ④预测装备润滑油中磨损元素浓度的变化趋势，结合先前制定的界限值进行磨损趋势预测。

然而，在机械装备的实际工作中，由于影响机械零件磨损的因素很多，如载荷、温度、速度、两个磨损表面的形貌以及润滑油的理化性能等，加之实验误差的影响，因此，从实验所得到的磨损量曲线不可能是一条光滑曲线，一般会出现一些波动。所以，对于一个实际模拟过程，在其稳定磨损阶段，一般有两个部分组成，即线性增长的确定性部分和沿着线性趋势变化的随机部分，可以用一下关系式表示：

$$Q(t) = A(t) + X(t) \quad (2.2)$$

$$A(t) = b_0 + b_1 t \quad (2.3)$$

组成公式的两部分有明确的物理意义， $Q(t)$ 表示总的磨损量， $A(t)$ 表示磨损量随时间稳定增长的过程， $X(t)$ 表示系统在受到载荷、温度、速度以及测量的误差影响之后，其磨损量呈现

的随机变化过程。系统在正常运行时， $X(t)$ 被认为是一个平稳随机过程。当系统的某个零件进入剧烈的磨损阶段时，则 $X(t)$ 已不是一个平稳随机过程，它表示系统的磨损已由一个状态变化到另外一个状态。

2.3 磨损元素界限值的制定方法

2.3.1 界限值类别及模糊性

（1）类别

机器出现的故障征兆，常常并非某一个界限值所能全面揭示反映。例如原子发射光谱仪，根据多年应用实践经验，需有磨损含量与取样频率关系统计的浓度界限值，相邻两个油样中含量变化统计的趋势界限值，两者必须相辅相成去捕捉故障朕兆，而趋势界限值往往可灵敏反映磨损变化烈度。某些行走机器中，为直观方便，还制定磨损含量与运行小时或行走公里关系的界限值。

（2）定量界限值边界的模糊性

以原子发射光谱仪为例，国内外所制定的 3 种或 4 种界限值，其边界仅相差 $1\mu\text{g/ml}$ 。例如表 2.2 和表 2.3 分别为美国军用车辆某行星变速箱 5R6192 和美国某军用燃气轮发动机的主要磨损元素界限值和异常趋势值；表 2.4 是我国某内燃机车柴油机的磨损元素界限值和趋势界限值。

表 2.2 美国军用车辆某行星变速箱 5R6192 的界限值

界限值（元素）	Fe	Al	Cu	Si	Pb
正常	0~154	0~15	0~202	0~69	0~14
临界	155~189	16~19	203~248	70~86	15~17
偏高	190~236	20~24	249~310	87~107	18~21
异常趋势值	47	4	62	21	22

表 2.3 美国军用飞机某燃气轮发动机的界限值

界限值（元素）	Fe	Ag	Al	Cr	Cu	Mg	Si
正常	0~13	0~3	0~10	0~5	0~8	0~10	0~33

临界	14~16	无	11~12	6	9	11~12	34~40
偏高	17~19	4	13~14	7	10~11	13~14	41~49
异常	≥20	≥5	≥15	≥8	≥12	≥15	≥49
异常趋势值	4	2	4	2	3	4	10

表 2.4 我国某内燃机车柴油机的界限值

界限值（元素）	Fe	Cu	Pb	Cr	Ni	Al i
正常	0~28	0~12	0~10	0~2	0~5	0~5
临界	29~33	13~17	11~14	2~3	6~8	6~7
异常	≥34	≥18	≥15	≥4	≥8	≥7
趋势警告值	13	8	9	3	6	6
趋势异常值	20	13	15	5	11	10

由表 2.2 和表 2.3 可见，各边界仅相差 $1 \mu\text{g}/\text{ml}$ ，对磨损类故障是不会这么灵敏，这要具体分析和采取应对策略。

磨损是渐变发展过程，界限值边界实际是一个小的模糊区，制定的界限值既能预报故障征兆，而且要留有一定保守裕度。例如当发现异常征兆时，还允许再做一次加密取样的时间间隔，确认抽样分析是否仍处于异常状态，而必须停机维修，这是应对各边界仅差 $1 \mu\text{g}/\text{ml}$ 的策略；若降到临界或正常范围，可继续运行，证明取样或分析中有偶然性。为安全计，还需做一次加密取样，这对连续运行机器或作战飞机不能轻易停机时必要的，是处理模糊区间的一种策略。美国三军装备的这种界限值和加密取样的逻辑程序，至今已应用 40 年，实践证明有重大成效。关于如何研究这种模糊性，这是另一类问题。

界限值需动态修改

机器在使用和维修过程中，由于以下原因需动态修改界限值。

1 机器在正常寿命期内运行，一般说来其磨损实渐增的；但在接近大修期间，磨损量值会较明显大于早期的磨损含量，故应将早期的油样分析结果淘汰，按中、后期的油样重新修改界限值。

2 机器大修后摩擦副配合总不如新机器，特别是更换进口配件或国产配件后。

3 机器的型号随科技发展而常常会更新，老型号与新型号的界限值不同。

4 机器所用的油品牌允许在几种油品中选择，不同油品的性能总有一定差别，最好制定不同界限值。

2.3.2 界限值的制定理论

概率论和数理统计是研究随即现象规律的有效工具。概率论是根据大量同类随机现象的统计规律，对随机现象出现的某一结果的可能性概率，做出客观的科学定义，对各种可能性出现的大小做出数量上的描述，比较它们的大小，研究它们之间的关系。而以概率论为基础的数理统计，是研究随即现象数据的整理、分析和推断，确定应有的定量值。

光谱油液分析是不解体监测装备磨损故障的一种方法，但如果不进行有效的二次开发研究，光谱油液分析就仅仅是一种单一的测试手段，而不能真正的成为一种先进有效的状态监测技术。为了利用光谱分析的数据对被监测装备的状态进行故障诊断和故障预报，行之有效的是使用特定的数学方法对数据进行统计，通过大量的试验得出某类装备发生磨损故障的界限值。用光谱分析数据与界限值对照，可直观地了解装备所处的磨损状态是正常、警告还是异常。光谱分析技术被应用于检测机械装备状态在国际上已有几十年的历史，并且有了很大的发展，而界限值方法是光谱分析检测装备最基本的方法，也是其他分析方法的基础。作为近年来发展的油液光谱分析故障诊断专家系统，界限值依然是其判断的主要依据之一。所以，科学地制定磨损元素的界限值具有重要的工程意义。

磨损元素界限值制定的方法有很多种，这里介绍 3 种：

① 浓度线性回归法

根据实验数据可知，摩擦副零件的磨损过程，在其正常使用期间，其磨损量随时间的增长近似成线性变化。由于光谱仪所测的数据具有离散性、动态性和统计性变化的特点，采用线性回归模型进行拟合，在回归线的基础上制定各种磨损金属浓度变化的警告线和异常线。

设给定 n 个油样采集点 $(t_1, y_1), (t_2, y_2) \dots (t_n, y_n)$

这些数据满足如下关系

$$y_i = a + b_i + e \quad (2.4)$$

$$e_i \sim N(0, s^2), (i=1, 2, \dots, n) \quad (2.5)$$

式中 y_i ：磨损金属元素的浓度值， 10^{-6} ；

b_i : 发动机运行的摩托小时, h ;

a : 回归直线的截距;

b : 回归直线的系数;

当 y_i 的理论值与实际值之间的残差之和最小时, 利用最小二乘法原理估计出 a 和 b 。

在线性回归模型的基础上, 利用光谱仪所得实际数据的均值和方差, 可得到各主要磨损金属元素的警告线和异常线。警告线和异常线的制定是在回归线的基础上, 分别将回归线向上平移二倍和三倍标准方差得到。

② 梯度控制图法

应用线性回归模型诊断发动机磨损状态时, 常会出现故障漏报现象, 因此, 提出装备各单位时间内磨损变化量这一指标, 有时, 它比监控磨损元素浓度绝对值更有意义。因为, 对于有些磨损金属元素, 由光谱仪多得到的分析数据, 其浓度值有时并没有超过该元素的浓度界限值, 但在短期内, 该元素的浓度值却急剧增加, 这通常是包含该元素的摩擦副将要发生异常磨损的征兆, 所以, 必须同时考虑梯度界限值指标。

梯度是单位时间内磨损金属元素浓度的变化量, 其定义为

$$g_i = (y_{i+1} - y_i) / (x_{i+1} - x_i) \quad (2.6)$$

式中 y_{i+1}, y_i : 相邻两次油样中磨损元素的浓度值, 10^{-6} ;

x_{i+1}, x_i : 相邻两次油样采集时发动机运行时间, h ;

所以

梯度均值

$$\bar{g} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g_i \quad (2.7)$$

梯度方差

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (g_i - \bar{g})^2 \quad (2.8)$$

磨损元素的梯度警告值和异常值的界限值定义为

警告值

$$G_w = \bar{g} + 2s \quad (2.9)$$

异常值

$$G_f = \bar{g} + 3s \quad (2.10)$$

③ 基于比例模型的数据处理

机械装备尤其是发动机在使用过程中，不可避免地要对装备使用的润滑油进行更换，如果装备换油或者补油，则油液中各元素的浓度值将会显著下降，这时只有使用浓度模型进行分析显然是不合适的。同样，如果使用梯度模型是发生换油，梯度模型也会受到一定的影响。但是在理论上，换油不会改变各磨损元素浓度之间的比例关系，所以比例模型相对于上述两种模型有着明显的优点。

此外，在实际油液监测应用中，尤其是对大型复杂发动机进行状态监测，不可能在很短的时间内多次反复取样和分析。在很多情况下，只取一次油样，对这一组数据进行分析，得出分析结论。由于只有一组数据，这样就不能得到梯度值，而且也不知道何时换油，得到的浓度值也不能说明问题，这是应用比例模型，就可以找出各磨损元素浓度之间的比例关系，依据制定的比例关系界限值，得出分析结论，进行机械装备的磨损状态监测。

比例模型的建立

对发动机润滑油进行规范取样，经光滑分析仪器分析得到各磨损元素的光谱诊断数据，记为

$$X = \{x_1, x_2, x_3 \dots x_n\} \quad (2.11)$$

式中 x_i : 各元素对应的浓度测量值, $10^{-6} \text{ } \mu\text{g/g}$

对一组光谱分析数据中的各元素数据进行两两相除，可以得出一系列的比例值，用向量 Y 表示

$$Y = \{y_{12}, y_{13}, \dots, y_{1n}, y_{23}, y_{24}, \dots, y_{(n-1)n}\} \quad (2.12)$$

式中 y_{ij} : 第 i 种元素浓度值与第 j 种元素同一时刻浓度值的比值。

对于上述数据处理，就可以得到相应元素之间的比值是否异常，为机械装备的磨损状态监测提供了依据。

第三章 基于概率密度估计的界限值制定方法概述

概率密度具有广泛应用，可用于数据挖掘中的聚类分析以及电子器件寿命估计和排队论。在一些情况下我们可以知道密度服从的分布，如电子器件寿命服从指数分布以及排队论服从泊松分布，他们的密度可以通过样本矩估计或极大似然估计等参数估计方法得到概率密度。但在实际应用中很多时候我们并不知道概率密度服从的分布，这是可根据样本点进行回归估计得到实际概率密度的一个近似估计。

3.1 传统方法的局限性

很多监测系统的开发都将统计特征作为其核心分析手段。其不足之处有两点。一是对监测数据的概率分布假定为正太分布。而监测数据的分布规律并不一定为正态分布，这样假设只仅仅为了计算的方便。经过最大熵概率分布算法验证实际油液监测数据的概率分布并不是正态分布。监测数据的概率分布是未知的，主观上的假定往往并不能正确反映现场监测数据的分布，从而引入了不可避免的误差，因此在不精确的假设下发展的相应监测方法的可靠性就将得不到保证。二是对样本数据的多少未做限定。在先验概率分布不明确的情况下，对油液分析与诊断的标准的制定必须准确可靠，通过最大熵原理求解数据最无偏、最一致的概率分布来准确地反映数据的分布规律，根据具体机器设备制定更为准确的油液监测标准，对异常状况检测及磨损状态评价的研究具有实际意义。

3.2 界限值制定的新方法

目前的概率密度估计方法主要分为参数估计和非参数估计两大类。参数估计方法具有较大的局限性，例如最大似然估计无法估计几个正态分布混合而成的概率密度函数；非参数估计具有更广泛的应用范围，以 Parzen 窗方法最为常用。然而该方法估计出的概率密度要用到所有的训练样本，当训练样本非常多时，这种方法并不实用。长期以来，人们希望寻求一种方法，只使用训练样本来估计概率密度（即寻求一种稀疏解），以减少计算量。支持向量机（SVM support vector machine）的解只和训练样本中的支持向量有关，因此它提供了一种良好的得到稀疏解的方法。

3.2.1 基于 K_n -近邻概率密度函数估计的界限值制定

3.2.1.1 概率密度的性质及构造

K_n -近邻法的基本思想是使体积为数据的函数，而不是样本数 N 的函数。比如说为了从 N 个样本中估计 $p(x)$ ，我们可以预先确定 N 的某个函数 K_n ，然后在 x 点周围选择一个体积，并让它不断增长直至捕获 K_n 个样本为止，这些样本为 x 的 K_n 个近邻。如果 x 点附近的密度比较高，测包含 k_n 个样本的体积自然就相对比较小，从而可以提高分辨力。如果 x 点附近的密度比较低，测体积比较大，但它一进入高密度区就会停止增大。

K_n 近邻的基本公式

$$\hat{p}(x) = \frac{k_n / N}{v_n} \quad (3.1)$$

假设条件满足

$$\lim_{n \rightarrow \infty} V_n = 0 \quad (3.2)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} k_n = 0 \quad (3.3)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} k_n / N \quad (3.4)$$

即 N 趋于无穷时， K_n 也趋于无穷。这样可以较好地用 $\frac{k_n / N}{v_n}$ 估计体积 v_n 中各点的概率。但我们还是要限制 K_n 不要增长的太快，以使随 N 的增加捕捉到 K_n 个样本的体积不至于缩小到零。

K_n 可以取为 N 的某个函数，如取 $k_n = k_1 \sqrt{N}$ 可以选择为某个大于零的常数，但至少要选择 k_1 使 $k_1 \geq 1$ 。在样本数 N 有限是，与 Parzen 窗类似， k_1 的选择也会影响到估计的结果。但当 $n \rightarrow \infty$ 时， $\hat{p}(x)$ 将收敛于未知总体分布 $p(x)$ 。

3.2.1.2 求解概率密度的数学模型

$$\hat{p}(x) = \frac{k_n / N}{v_n} \quad (3.5)$$

3.2.1.3 基于 K_n -近邻的概率密度函数估计方法验证

产生 1000 个服从正态分布 $N(0, 1)$ 的随机样本点，利用 k_n -近邻进行概率密度估计，核函数中的 k_1 的值取 1， N 取 1000。实验结果如图 3.1 和图 3.2 所示，从图中可以看出构造的概率密度与实际的概率密度非常接近。显然，用 k_n -近邻方法求解出的概率密度函数可以较好的逼近实际的概率密度。

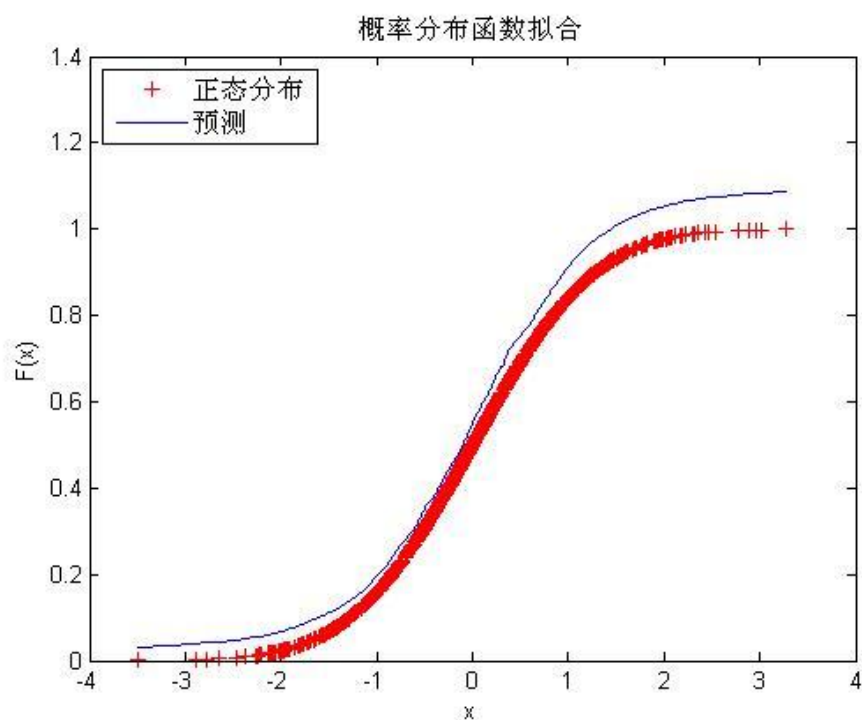


图 3.1 k_n -近邻法估计概率分布

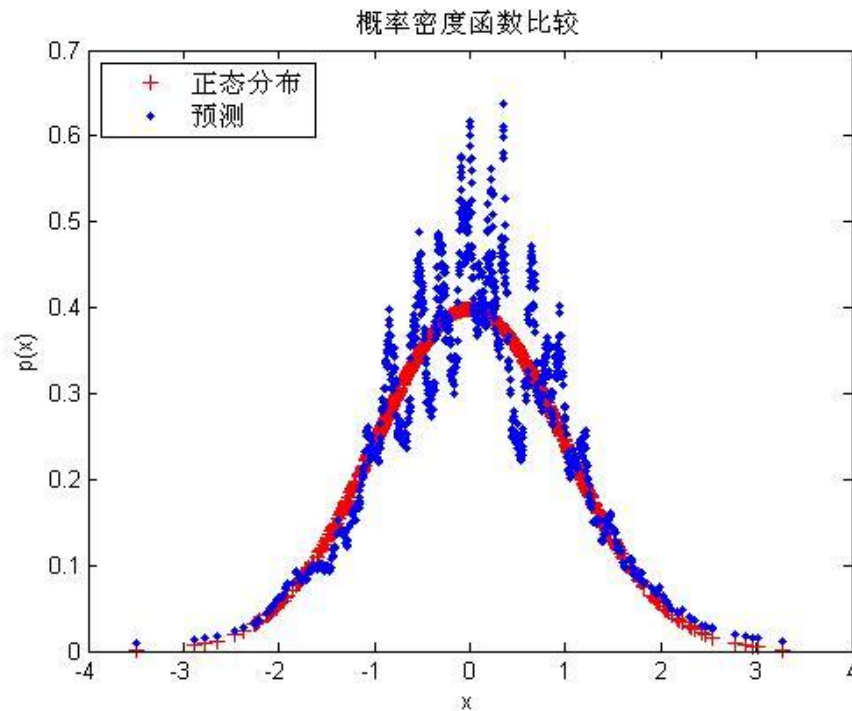


图 3.2 Kn-近邻法估计概率密度函数

最后还应指出， K_n 近邻估计也存在一般非参数估计的问题，即所需样本很多，因而计算量、存储量很大。尤其是在高维情况下更是如此。我们的经验表明，一维时用数百个样本一般可以得到较好的结果，而二维估计就要数千个样本，随着维度增加，样本数急剧增多。

3.2.2 基于 Parzen 窗概率密度函数估计的界限值制定

3.2.2.1 概率密度的性质及构造

Parzen 窗法的思想是，使区域序列 v_n 以 N 的某个函数（例如 $v_n = \frac{1}{\sqrt{n}}$ ）的关系不断缩小。

但是这时对 K_n 和 K_n/n 都要加些限制条件以使 $\hat{p}(x)$ 收敛于 $p(x)$ 。

基本公式

$$\hat{p}(x) = \frac{k_n / N}{v_n} \quad (3.5)$$

3.2.2.2 求解概率密度的数学模型

现在我们仍然利用这一公式，并假设区域 R_n 是一个 d 维超立方体。如果 h_n 是超立方体的

楞长，则该立方体的体积为

$$V_n = h_n^d \quad (3.6)$$

定义窗函数

$$\Phi(u) = \begin{cases} 1, & \text{当 } |u_j| \leq \frac{1}{2}, j=1, 2, \dots, n \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

利用此公式可把落入该超立方体内的样本数用解析式表示出来。由于 $f(u)$ 是以原点为中心的一个超立方体，所以，当 x_i 落在以 x 为中心、体积为 v_n 的超立方体内时， $f(u) = f[\frac{x-x_i}{h_n}] = 1$ ，否则为 0。因此落入该超立方体内的样本数为

$$k_n = \sum_{i=1}^n f[\frac{x-x_i}{h_n}] \quad (3.7)$$

将 3.7 式带入 3.5 式中，得

$$\hat{p}(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{1}{V_n} f\left[\frac{x-x_i}{h_n}\right] \quad (3.8)$$

这就是 Parzen 窗法估计的基本公式。当然窗函数不限于超立方体窗函数，还可有更一般的形式。公式 3.8 表示 $p(x)$ 的估计可以看作是 x 和 x_i 的函数的一种平均。实质上，窗函数的作用是内插，每一样本对估计所起的作用依赖于它到 x 的距离。

3.2.2.3 基于 Parzen 的概率密度函数估计方法验证

产生 1000 个服从正态分布 $N(0, 1)$ 的随机样本点，利用 Parzen 窗进行概率密度估计，核函数中的 h 的值取 1， n 取 1。实验结果如图 3.3 和图 3.4 所示，从图中可以看出构造的概率密度与实际的概率密度非常接近。

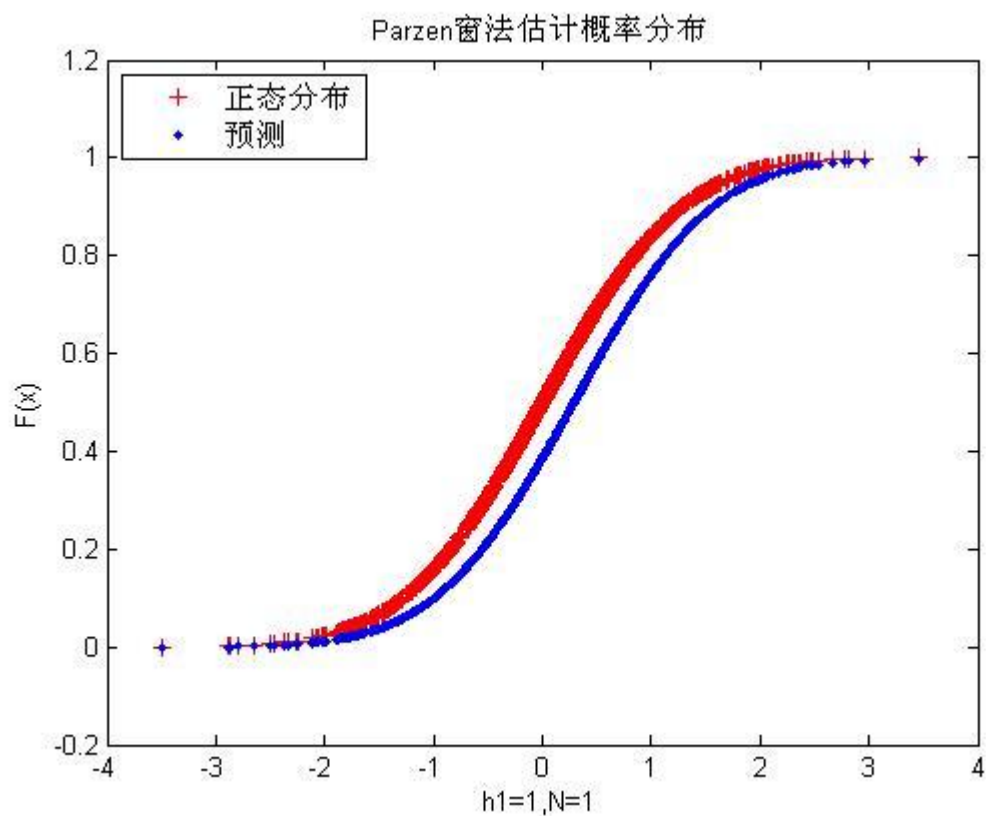


图 3.3 Parzen 窗法估计概率分布

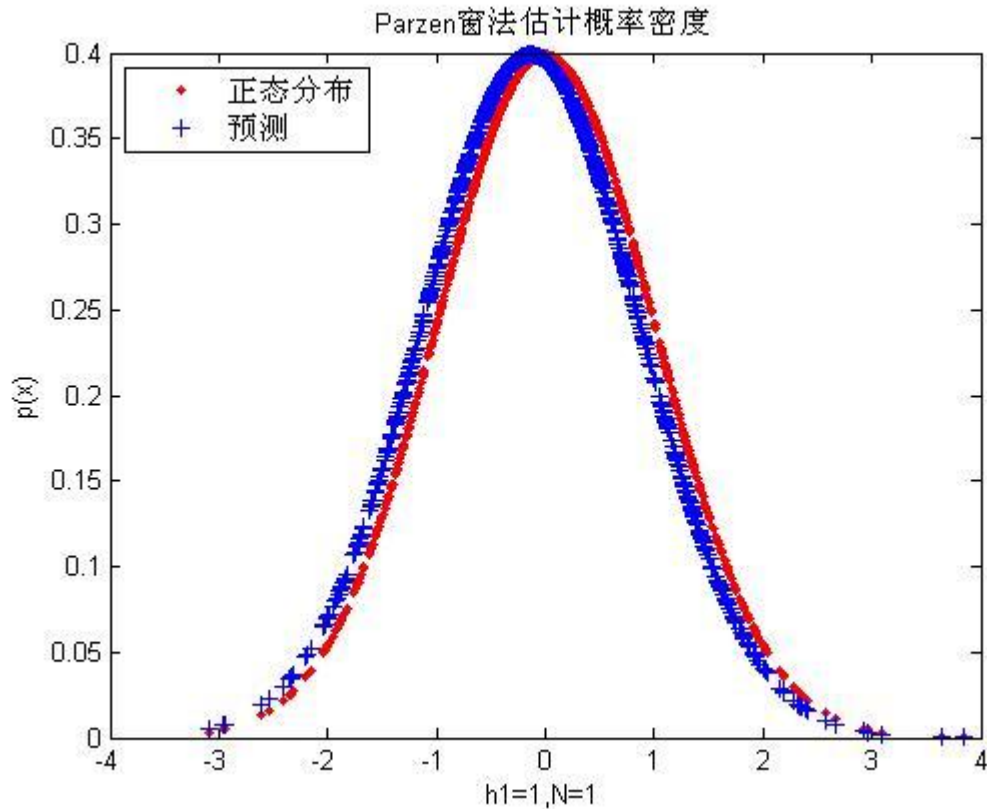


图 3.4 Parzen 窗法估计概率密度函数

最后分析窗宽 h_n 对估计量 $p(x)$ 的影响：

在样本数 N 有限时，窗宽 h_n 对估计量会有很大影响。现在让我们分析一下原因。

如果定义函数 $d_n(x)$ 为

$$d_n(x) = \frac{1}{V_N} f\left(\frac{x}{h_n}\right) \quad (3.9)$$

则可以把 $\hat{p}(x)$ 看作一个平均值

$$\hat{p}(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n d_n(x - x_i) \quad (3.10)$$

因为 $V_n = h_n^d$ ，所以 h_n 影响 $d_n(x)$ 的幅度。若 h_n 很大，则 d_n 的幅度就很小，同时只有 x_i 离 x 较远时才能使 $d_n(x - x_i)$ 同 $d_n(x)$ 相差的多一些。这时 $\hat{p}(x)$ 变成 N 个宽度较大且函数值变化缓慢的函数的叠加，从而它是 $p(x)$ 的一个平均的估计，使估计的分辨力降低。

反之，若 h_n 很小，则 $d_N(x-x_i)$ 的幅值很大，这时 $\hat{p}(x)$ 就成了 N 个以样本为中心的尖峰函数的叠加，使估计的统计变动很大。在 $h_n \rightarrow 0$ 的极端情况， $d_N(x-x_i)$ 趋于一个以 x_i 为中心的 d_n 函数叠加。

当然，应该指出， h_n （或 V_n ）的选取，对 $\hat{p}(x)$ 有重要的影响。可以让 V_n 随 N 的不断增大而缓缓趋于零，而使 $\hat{p}(x)$ 收敛于 $p(x)$ 。然而实际问题都是有限样本的情况，因此实际中如何选取 h_n 的确需要一定的经验，一般要作适当折中考虑。

3.2.3 基于支持向量机的概率密度函数估计

3.2.3.1 概率密度的性质及构造

用 SVM 方法来估计概率密度，就是从概率密度的定义出发，直接求解线性算子方程的解^[7,8,9,10]。它结合了不适定问题的理论、传统的非参数统计学以及统计学习理论等方面的思想。根据概率密度的定义，密度 $p(x)$ 是下面积分方程的解：

$$\int_{-\infty}^x p(x) dt = F(x) \quad (3.11)$$

密度估计问题的一般形式化表示可以描述为：在给定的函数集 $\{p(x)\}$ 中，寻找作为积分方程（3.11）的解函数，但分布中的概率分布函数 $F(x)$ 未知，已知条件是一系列给定的独立同分布样本 $x_1, x_2, \dots, x_L$ ，利用这些样本，可以构造经验分布函数：

$$Af(t) = F(x) \quad (3.13)$$

其中算子 A 实现了一个从希尔伯特空间 E_1 到希尔伯特空间 E_2 的一对一映射。

由于概率分布函数 $F(x)$ 未知，已知对该函数的一些观测： $(x_1, F_1(x_1)), (x_2, F_1(x_2)), \dots, (x_L, F_1(x_L))$ ，问题可以重新描述为：在函数集

$$f(t, w) = \sum_{r=1}^{\infty} w_r f_r = (w \cdot f(t)) \quad (3.14)$$

中寻找目标函数，通过算子 A 把函数集（3.14）式映射到导函数集

$$F(x, w) = Af(t, w) = \sum_{r=1}^{\infty} w_r Af_r(t) = \sum_{r=1}^{\infty} w_r j_r(x) = (w \cdot \Psi(x)) \quad (3.15)$$

它在另一个特征空间 $\Psi(t) = (j_1(t), \mathbf{K}, j_N(t), \mathbf{K})$ 中是线性的，其中， $j_r(x) = A j_r(t)$ 。

定义像空间中的生成核为（假设对任意固定的 x_i 和 x_j 都收敛）

$$K(x_i, x_j) = \sum_{r=1}^{\infty} j_r(x_i) j_r(x_j) \quad (3.16)$$

定义交叉核函数为（假设算子 A 使得该式右边对任意固定的 x_i 和 t 都收敛）

$$k(x_i, t) = \sum_{r=1}^{\infty} j_r(x_i) f_r(t) \quad (3.17)$$

显然，寻找算子方程的解（寻找对应的系数向量 w ）的问题与在像空间中利用观测 $(x_1, F_1(x_1)), \mathbf{K}, (x_l, F_l(x_l))$ 寻找线性回归函数式（3.16）的向量 w 的问题是等价的。

利用二次优化支持向量技术来求解该回归问题，即用式（3.14）的核求出支持向量 $x_i, i=1, \mathbf{K}, N$ 和相应的系数 b_i ，它们定义了支持向量回归逼近的向量 w ：

$$w = \sum_{i=1}^N b_i \Psi(x_i) \quad (3.18)$$

由于同样的系数 w 定义了对算子方程的解的逼近，我们可以把这些系数代入到表达式（4）中，从而得到线性算子方程的解：

$$f(t, b) = \sum_{i=1}^N b_i (\Psi(x_i) \cdot \Phi(t)) = \sum_{i=1}^N b_i k(x_i, t) \quad (3.19)$$

3.2.3.2 求解概率密度的数学模型

本文采用 e 不敏感损失函数的线性 SVM 方法。进行回归估计，该问题等价于：

$$\min F(x, x^*) = \sum_{i=1}^l d_i b_i + \sum_{i=1}^l x + \sum_{i=1}^l x^* \quad (3.20)$$

$$\text{s.t. } y_j - \sum_{i=1}^l b_i K(x_j, x_i) \leq e + x_j^* \quad j = 1, 2, \mathbf{L}, l; \quad (3.21)$$

$$\sum_{i=1}^l b_i K(x_j, x_i) - y_j \leq e + x_j \quad j = 1, 2, \mathbf{L}, l; \quad (3.22)$$

$$\sum_{i=1}^l b_i = 1; \quad x_j^* \geq 0, x_j \geq 0, b_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \mathbf{L}, l. \quad (3.23)$$

$$d_i = \frac{1}{l} \sum_{j=1}^l \|x_i - x_j\|_2 \quad (3.24)$$

$$e = \min \sqrt{\frac{1}{l} y_i (1 - y_i)} \quad j = 1, 2, \dots, l \quad (3.25)$$

逼近精度 e 越低则需要支持向量的个数越少。本文采用核函数^[11]为：

$$K(x, z) = 1 / (1 + e^{-t(x-z)}) \quad (3.26)$$

$$k(x, z) = t / (2 + e^{t(x-z)} + e^{-t(x-z)}) \quad (3.27)$$

t 为一常数，函数 K 是 k 的积分，经检验 $k(x, z) \geq 0$ 且 $\int_{-\infty}^{+\infty} k(x, z) dx = 1$ 。

3.2.3.3 基于 SVM 的概率密度函数估计方法验证

产生 40 个服从正态分布 $N(0, 1)$ 的随机样本点，利用 SVM 进行概率密度估计，核函数中的 t 的值取 1.85。实验结果如图 3.5 和图 3.6 所示，从图中可以看出构造的概率密度与实际的概率密度非常接近，并且支持向量仅占总样本的 38.6%。显然，用支持向量机方法求解出的概率密度函数不仅可以很好的逼近实际的概率密度，并且只利用了训练样本中对概率密度估计影响最大的少量样本。

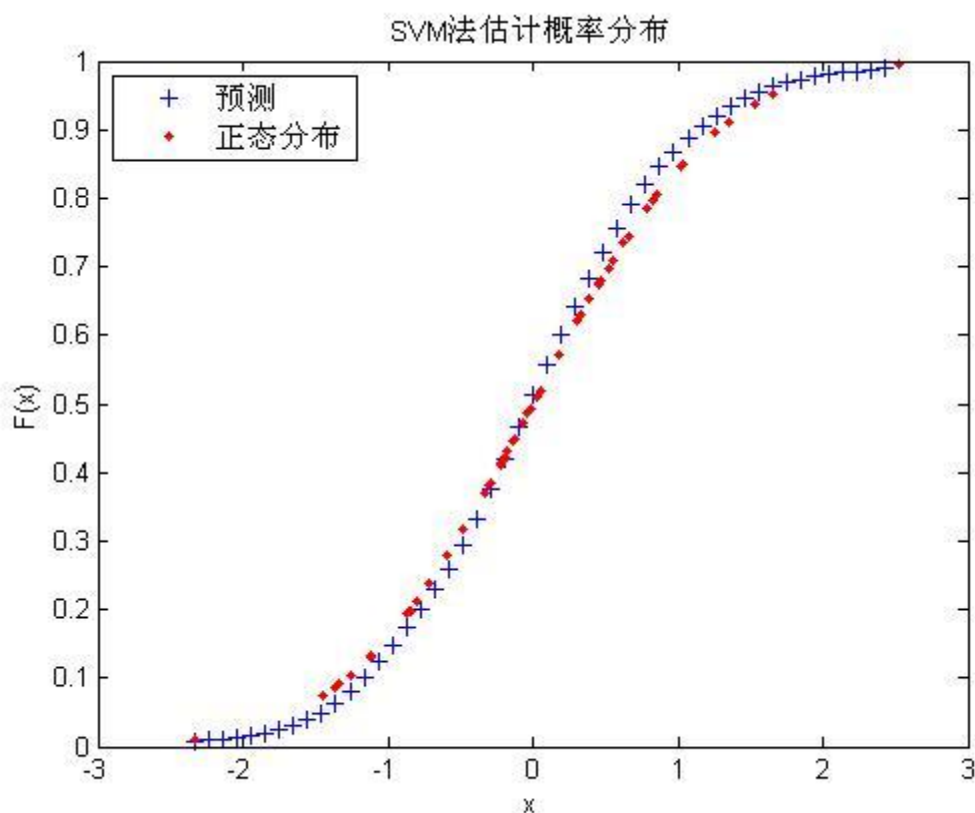


图 3.5 SVM 法估计概率分布

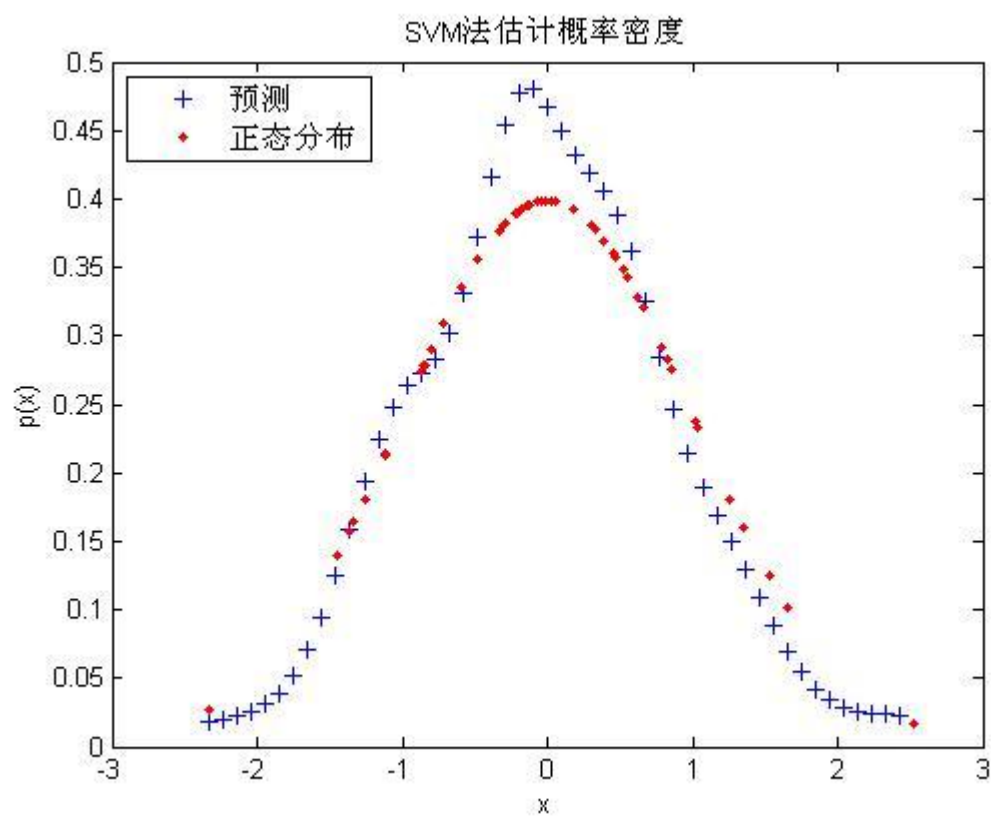


图 3.6 SVM 法估计概率密度函数

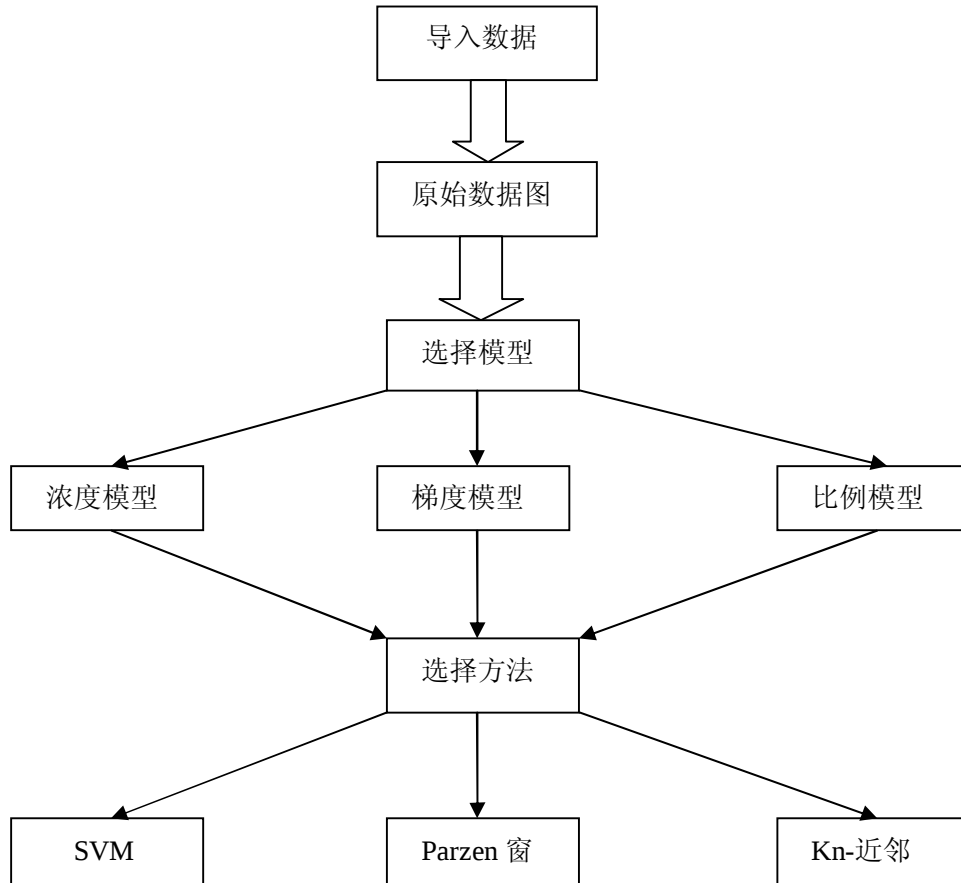
第四章 基于 MATLAB 光谱诊断界限值软件平台开发

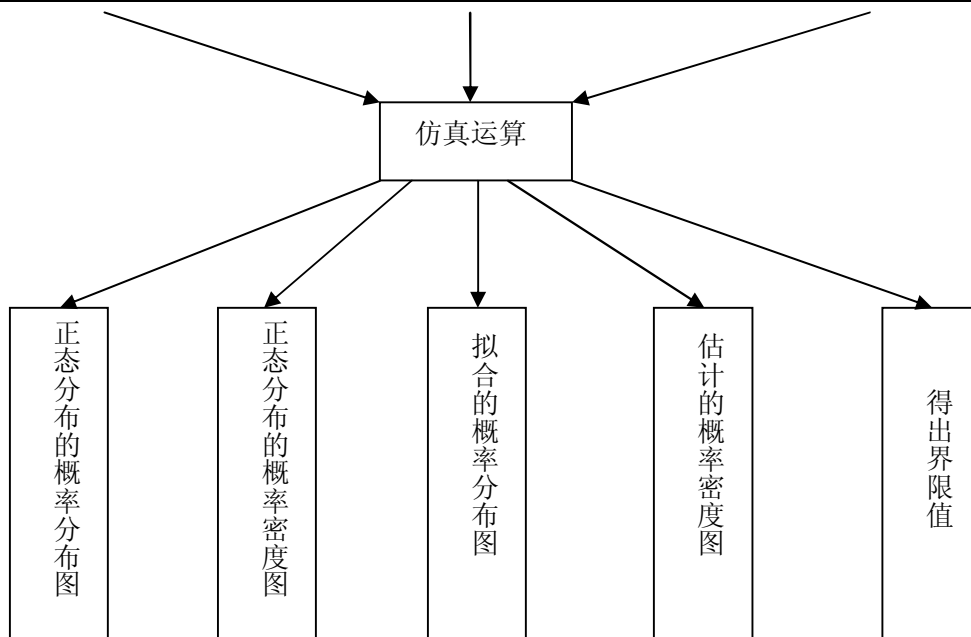
系统的主要功能是实现仿真运算，制定界限值。软件主要是 MATLAB 应用软件。在软件的开发中，本文采用了三种不同的模型来研究磨损颗粒的概率分布，实现了三种不同算法对故障特征进行仿真，下面将会对这三种方法分别予以介绍。

4.1 系统简介

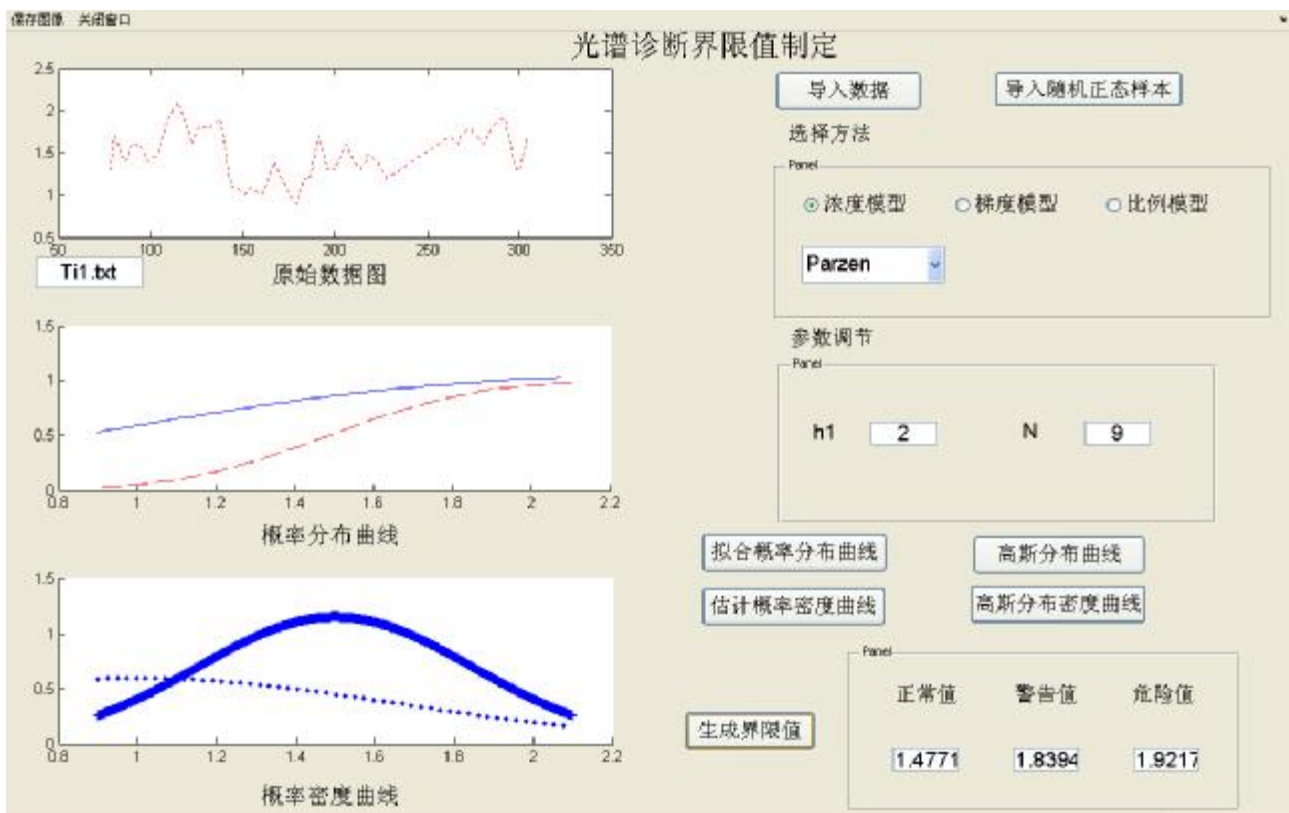
基于 MATLAB 平台，利用参数估计和非参数估计的数学方法，对得到的实验数据进行仿真运算，是本论文的核心内容，该功能依附 MATLAB 软件的 GUI 功能，做出一个简易的人机交互界面，实现基本的导入数据、选择算法、进行仿真与拟合等功能，最终通过图形的形式表现出来，对比结果，得出结论。

4.1.1 流程图





4.1.2 界面图



软件界面如图所示，左边是 3 个坐标轴，用以分别显示元素数据的原始数据图、概率分布图和概率密度图。右边主要是功能性按钮，介绍如下：

- (1) 导入数据键：实现导入原始数据的功能。
- (2) 导入正太随机样本：实现导入一组符合正态分布的随机样本。
- (3) 浓度模型、梯度模型和比例模型：实现对导入数据的基本处理，构成基本的模型。
- (4) SVM、Parzen 窗和 Kn-近邻：实现 SVM、Parzen 窗和 Kn-近邻估计的算法，是软件的核心程序。
- (5) 参数调节：实现动态窗口变换，对每种不同方法，响应不同的参数界面供用户调节。
- (6) 拟合概率分布曲线：根据响应的算法，实现概率分布曲线的拟合，在坐标轴上显示。
- (7) 估计概率密度曲线：根据响应的算法，实现概率密度曲线的估计，在坐标轴上显示。
- (8) 高斯分布曲线：假定样本是正态分布的情况下，实现分布曲线的显示。
- (9) 高斯分布密度曲线：假定样本是正态分布的情况下，实现概率密度曲线的显示。
- (10) 生成界限值：根据响应的算法，实现制定界限值的功能，在界面中显示出来。

4.2 结果分析

鉴于概率密度估计方法的优越性，本文利用实际的航空发动机光谱数据，应用该方法进行实际航空发动机光谱数据的概率密度的近似估计，然后科学地制定出光谱诊断界限值，并与传统的基于正态分布假设下所确定的界限值进行比较分析，表明了本文基于 Kn-近邻、Parzen 窗、SVM 的油样光谱界限值制定方法所得到的结果更加真实可靠。

本文采用由空军装备研究院航空装备研究所提供的型号为 410993323019 的航空发动机油样光谱监测数据，该数据为发动机从 78 小时到 307 小时工作期间采集得到的 47 个油样，数据包含了对发动机影响比较大的 Fe、Cu、Cr、Ag、Ti 及 Mg 等 6 种元素。下列各图是各个元素的浓度随发动机运行时间的变化趋势图。

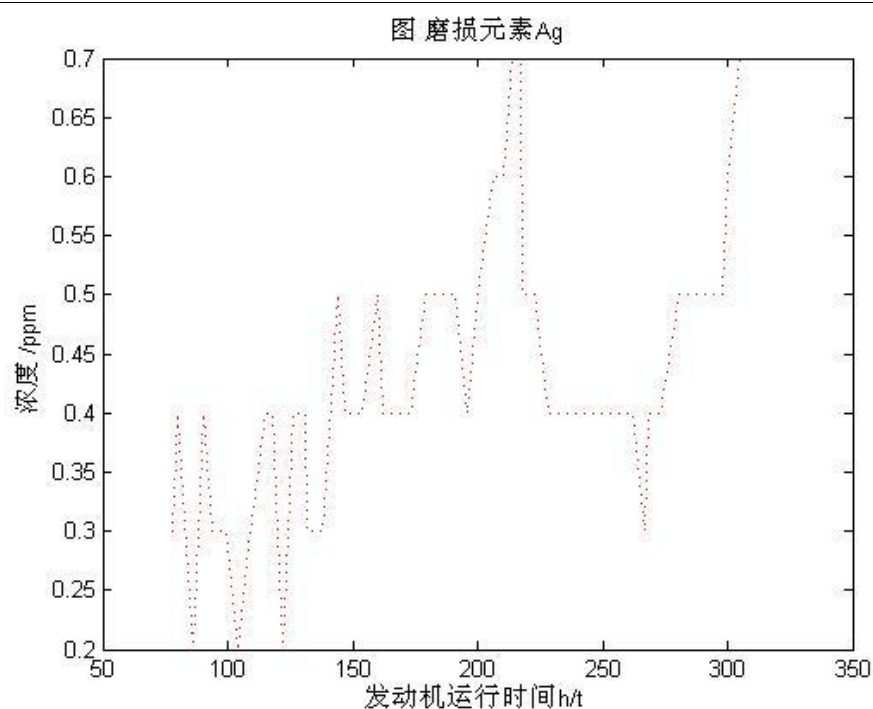


图 4.1 磨损元素 Ag

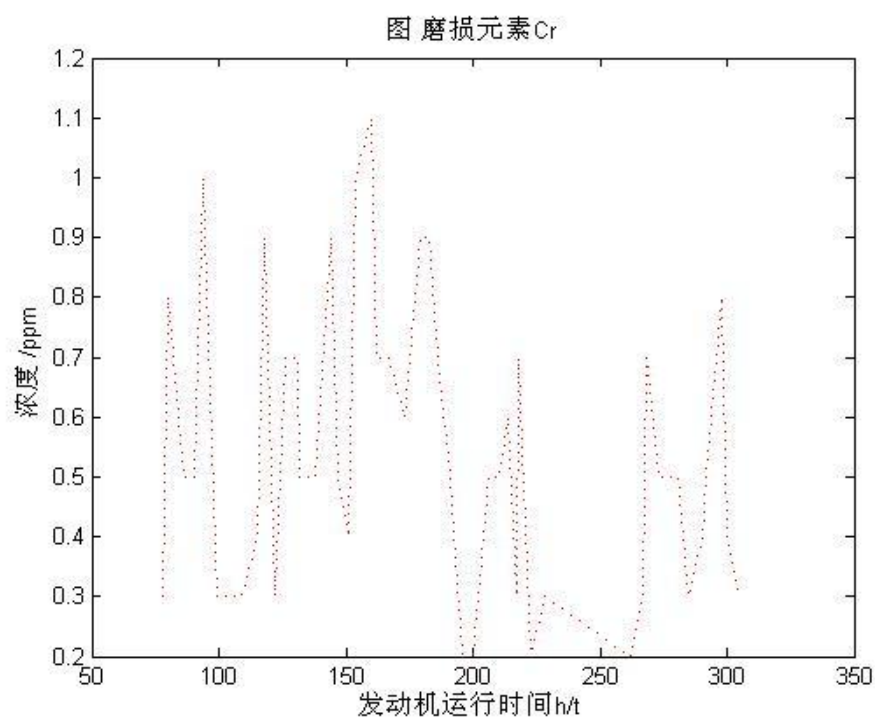


图 4.2 磨损元素 Cr

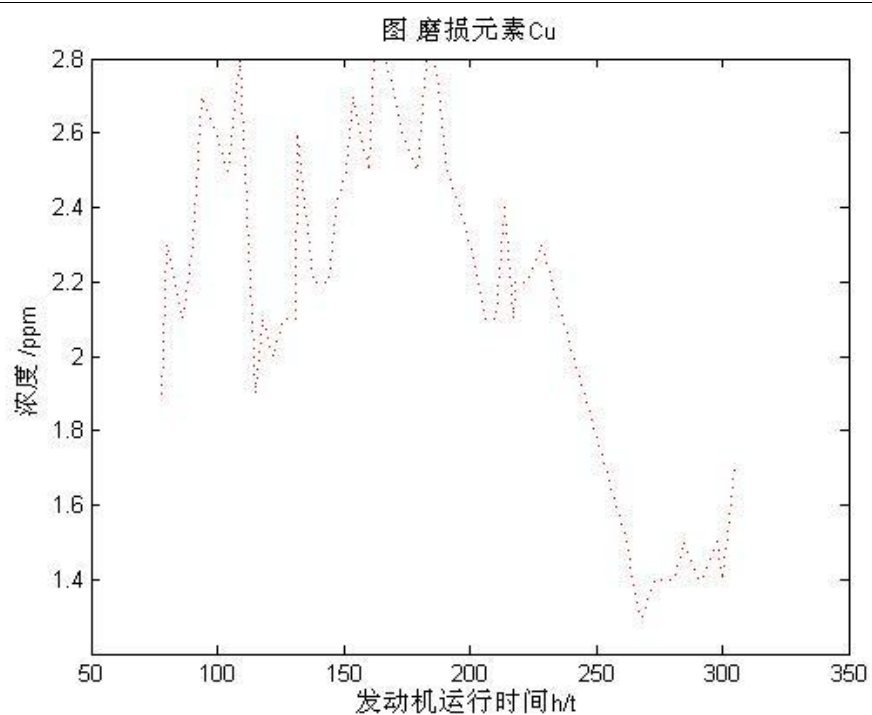


图 4.3 磨损元素 Cu

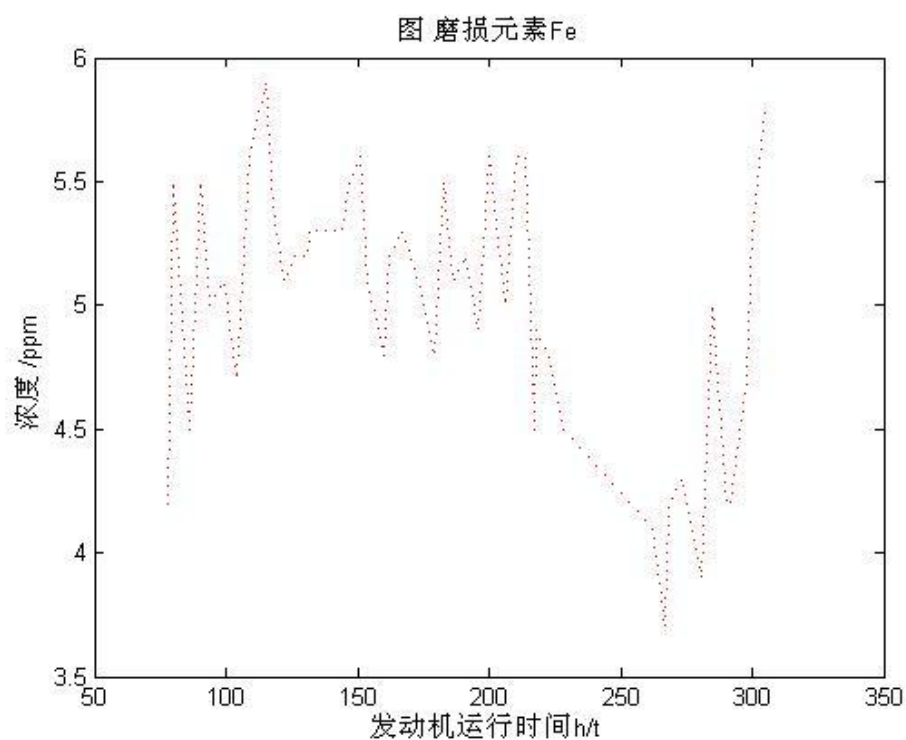


图 4.4 磨损元素 Fe

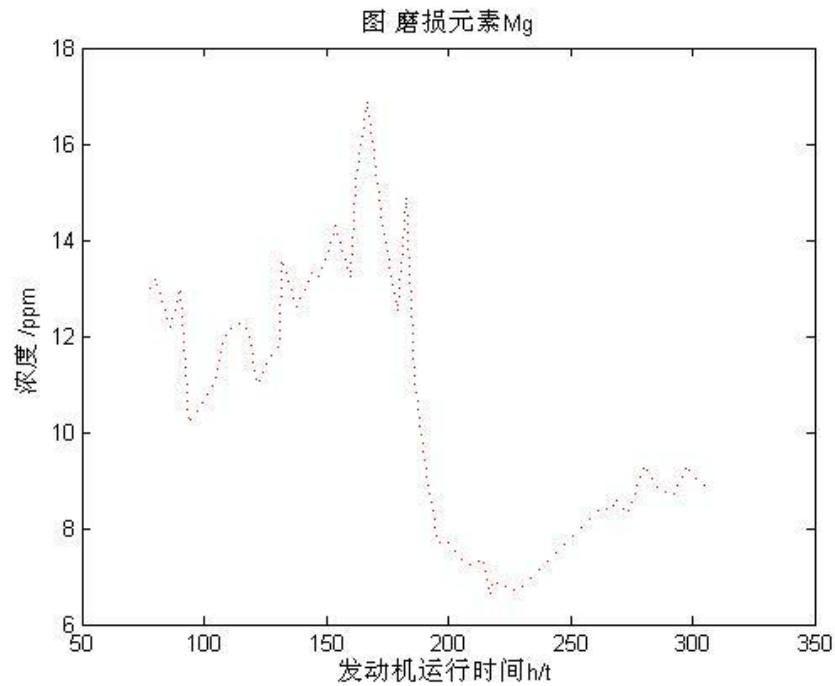


图 4.5 磨损元素 Mg

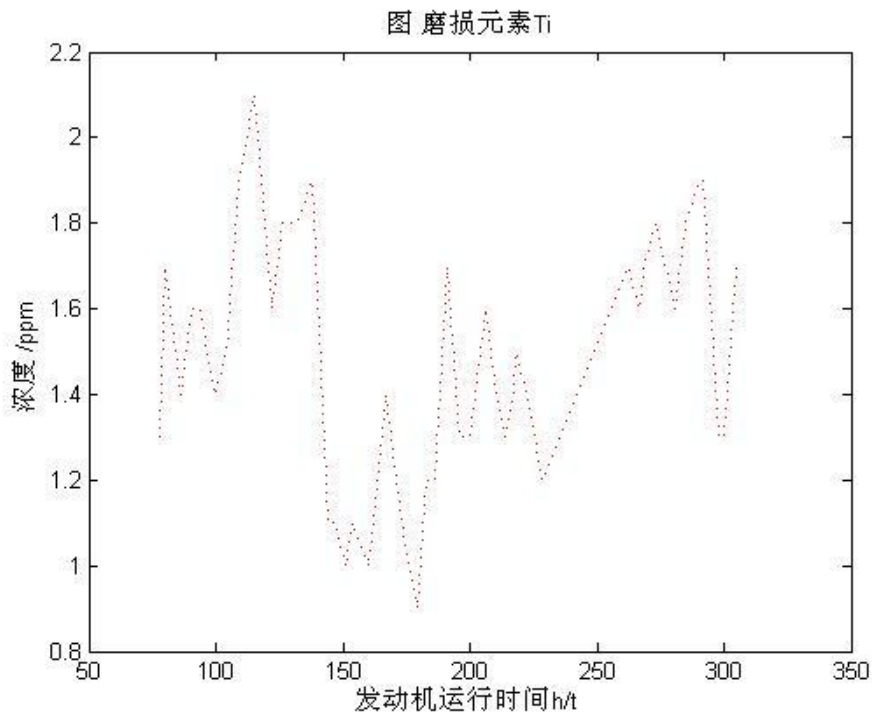


图 4.6 磨损元素 Ti

4.2.1 Kn-近邻的航空发动机界限值分析

由于近邻估计的概率密度函数有较大抖动，在制定界限值时带来一个 x 值对应 2 个概率分布值的情况，

在实际应用中效果不是很理想，故在此只附上拟合的曲线图，不列出界限值制定的表格。

4.2.1.1 浓度界限值的制定

以 Ti 元素为例，采用浓度模型，进行仿真的结果如图所示：

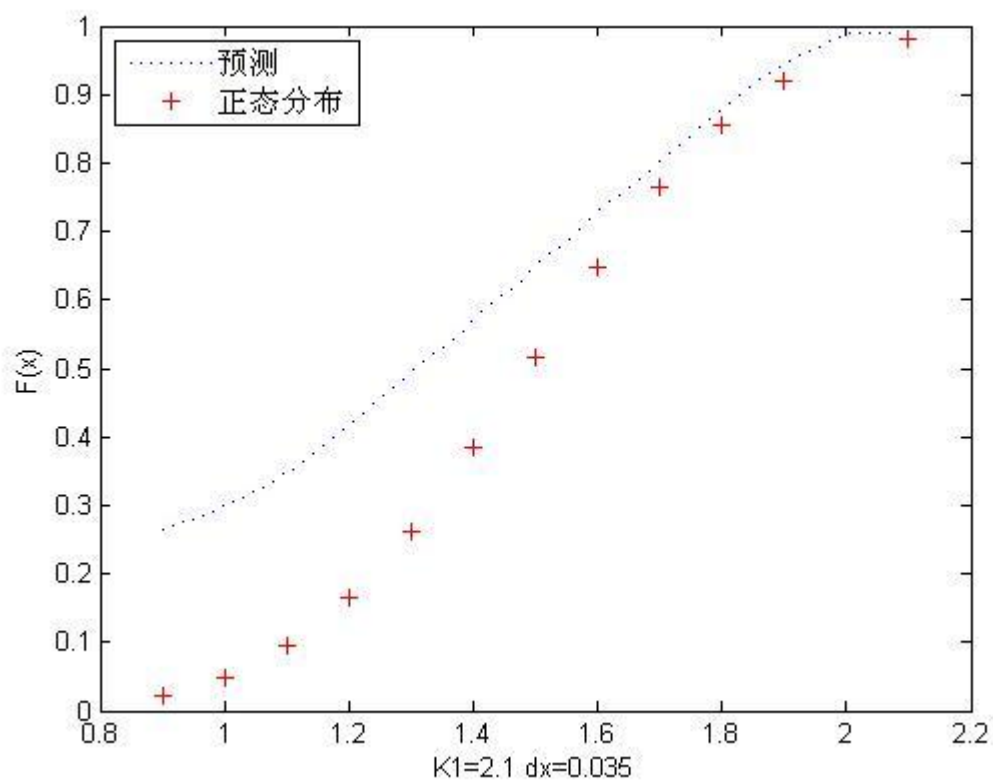


图 4.7 Ti 元素浓度概率分布

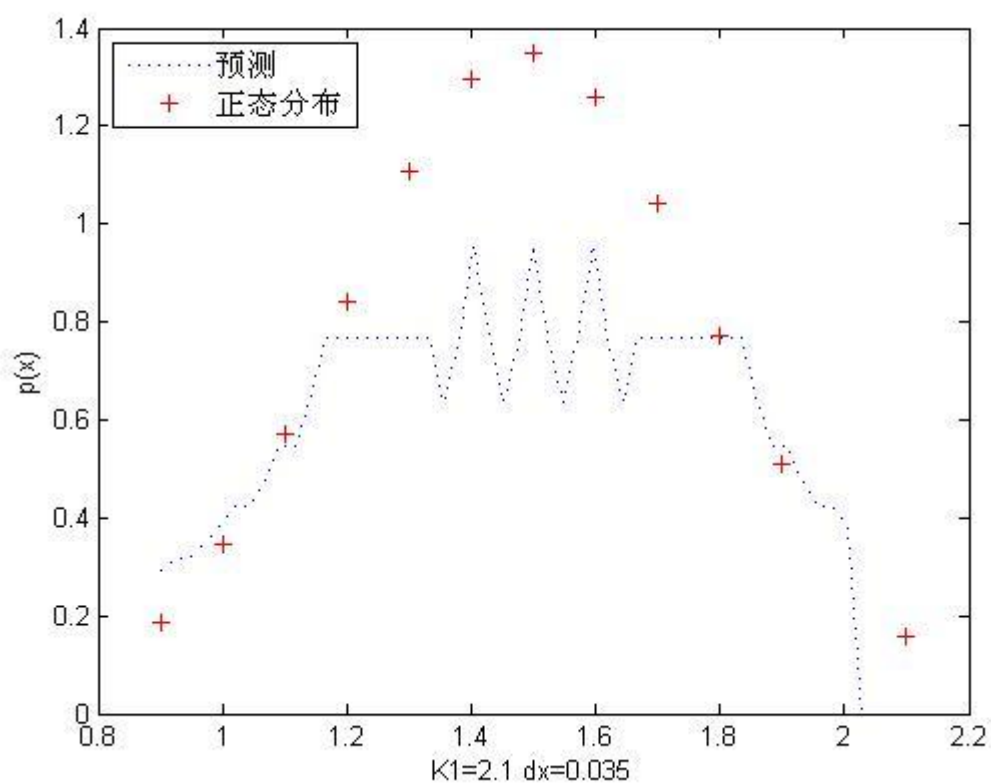


图 4.8 Ti 元素浓度概率密度函数

4.2.1.2 浓度梯度界限值的制定

以 Ti 元素为例，采用浓度梯度模型，进行仿真的结果如图所示：

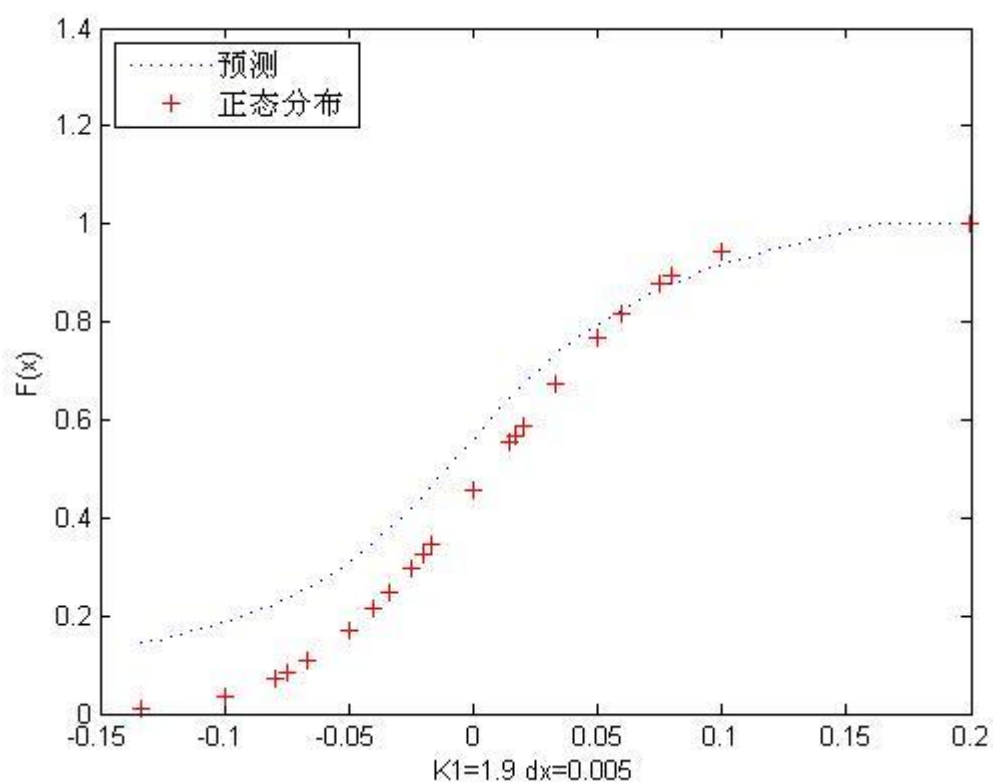
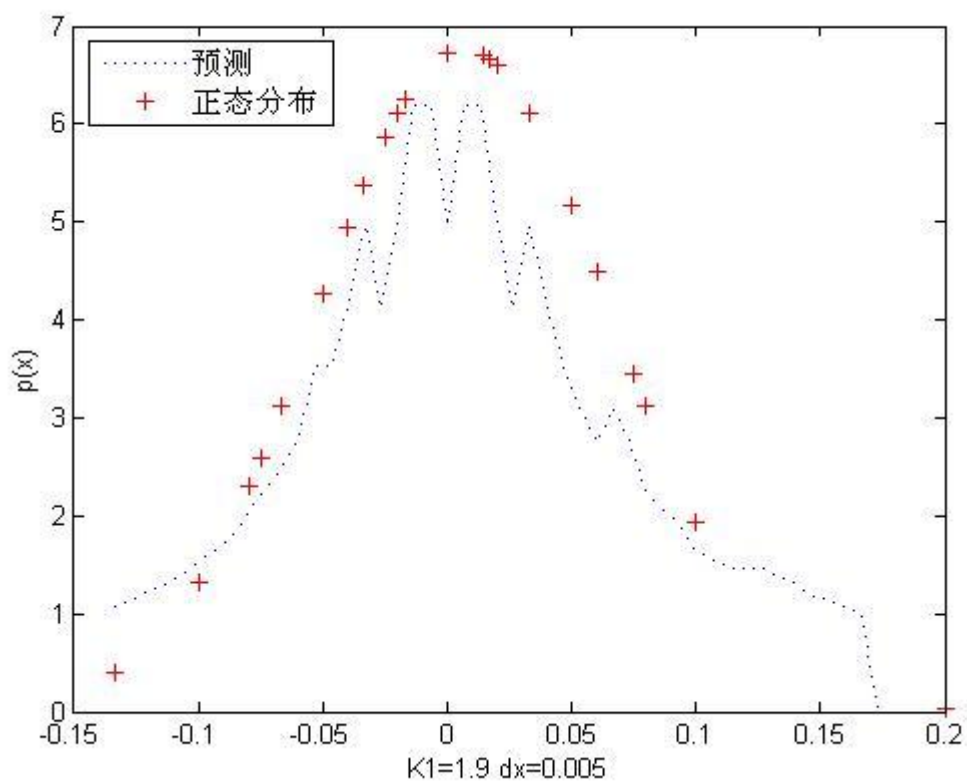


图 4.9 Ti 元素浓度梯度概率分布



4.2.1.3 浓度比例界限值的制定

以 Ti 元素为例，采用浓度比例模型，Ti 与 Fe 元素组成比例模型，进行仿真的结果如图所示

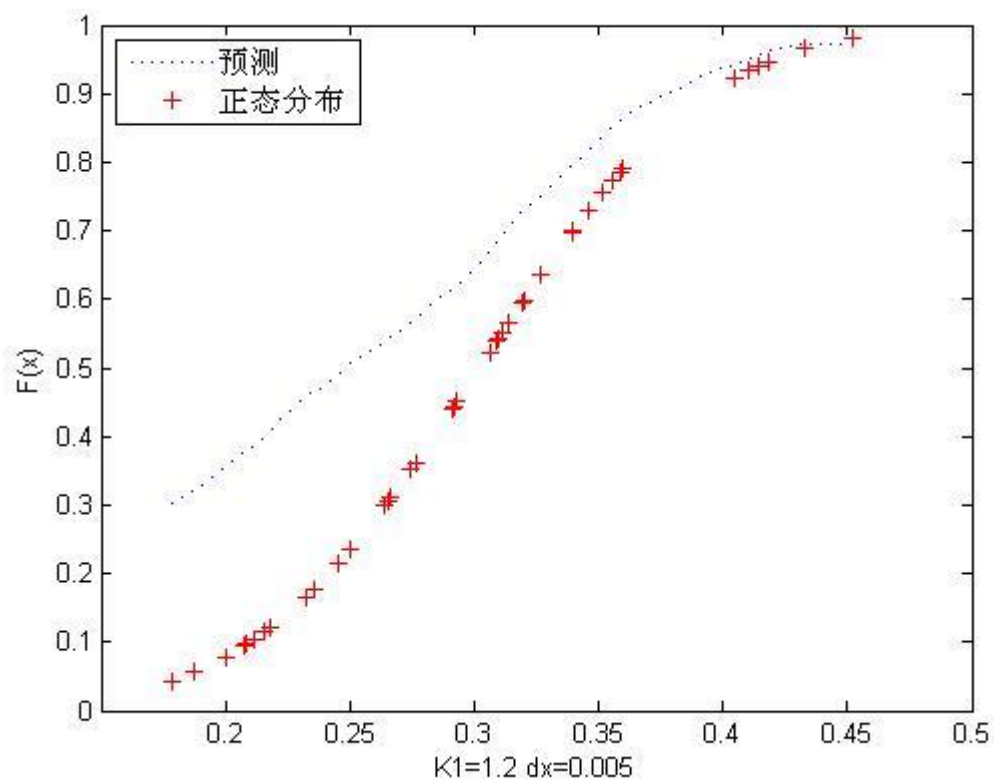


图 4.11 Ti/Fe 元素浓度比例概率分布

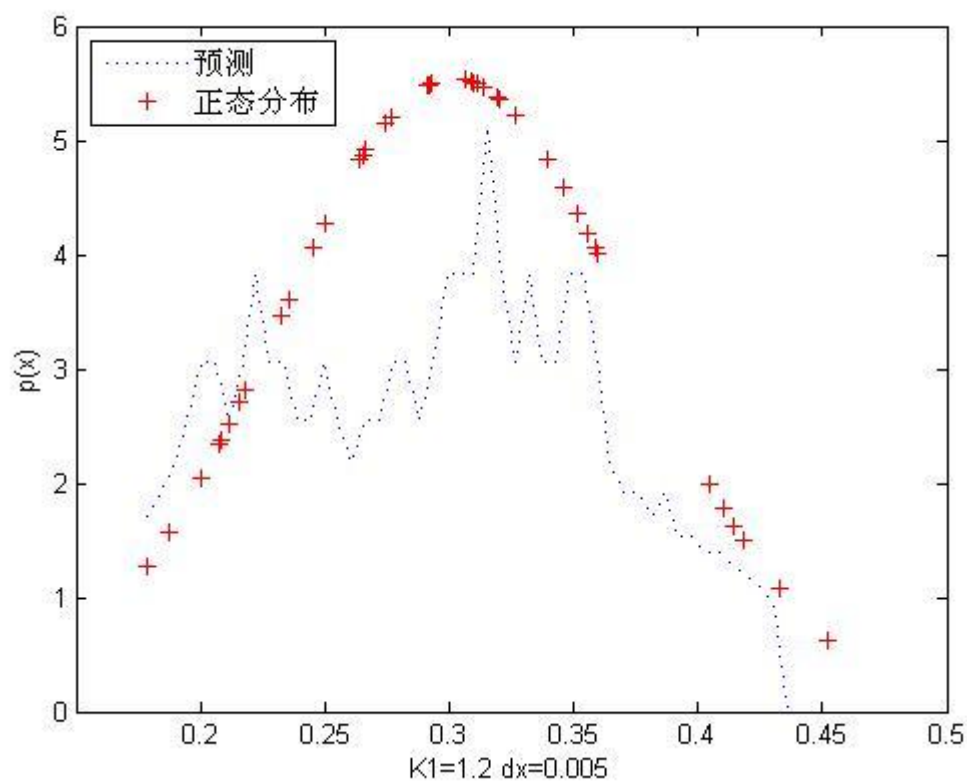


图 4.12 Ti/Fe 元素浓度比例概率密度函数

4.2.2 Parzen 窗的航空发动机界限值分析

4.2.1.1 浓度界限值的制定

以 Cu 元素为例，采用浓度模型，进行仿真的结果如图所示：

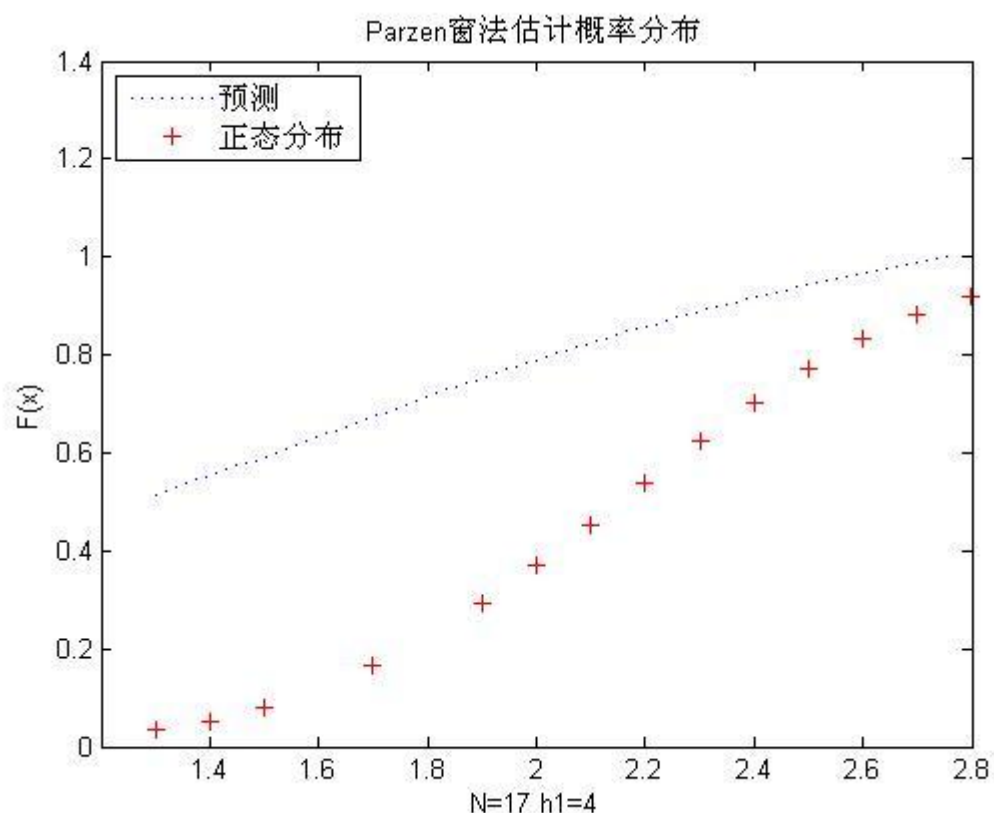


图 4.13 Cu 元素浓度概率分布

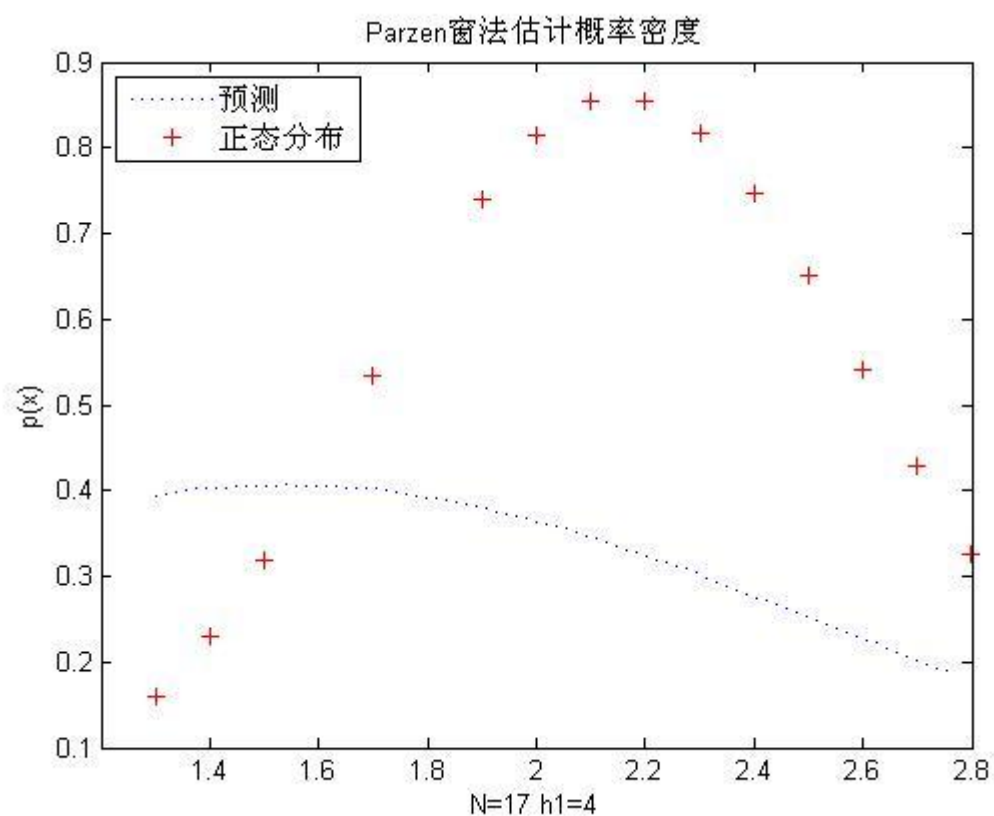


图 4.14 Cu 元素浓度概率密度函数

图中红色部分为传统的基于正态分布假设下得到的元素光谱浓度概率密度函数曲线以及概率分布曲线。从图中可以看出，经 Parzen 窗估计得到的实际油液监测数据并不服从正态分布。

根据本文对正常分界点、警告分界点和危险分界点的规定得该型发动机 Cu 元素光谱监测诊断标准的三个关键运行状态分界点为：正常限 2.1757；警告限 2.6604；异常限 2.7626。以及假设 Cu 元素服从正态分布的情况下得到的界限值：正常限 2.62；警告限：3.08；异常限：3.35。

对于其他元素，同理可以得到其界限值，如表 4.1 所示，其中括号中的值为依据正态分布假设得到的界限值。

表 4.1 发动机主要元素浓度界限值

元素		Fe	Cu	Cr	Ag	Ti	Mg
界限值	正常	4.2698 (5.52)	2.1757 (2.62)	0.3209 (0.78)	0.3533 (0.55)	1.4772 (1.78)	12.7629 (13.37)
	警告	5.0041 (6.04)	2.6604 (3.08)	0.4033 (1.00)	0.4875 (0.67)	1.8394 (2.08)	15.8520 (16.03)
	异常	5.1318 (6.57)	2.7626 (3.55)	0.4229 (1.256)	0.5495 (0.79)	1.9217 (2.37)	16.5665 (18.70)

4.2.2.2 浓度梯度界限值的制定

以 Fe 元素为例，进行 Parzen 窗法仿真结果如下图所示：

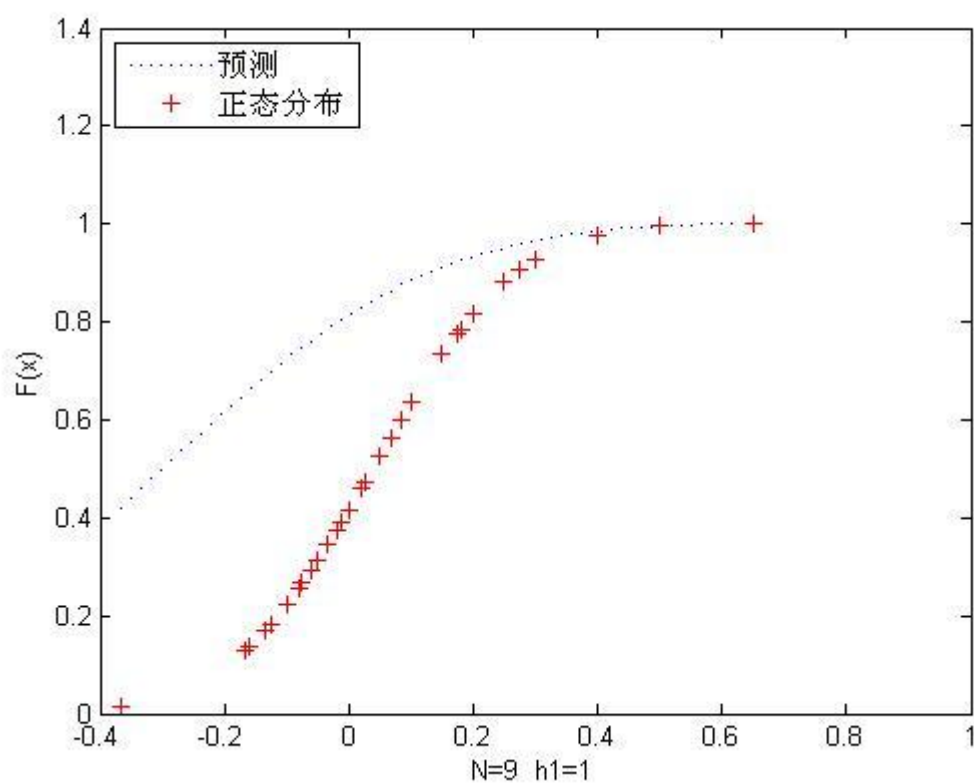


图 4.15 Fe 元素浓度梯度概率分布

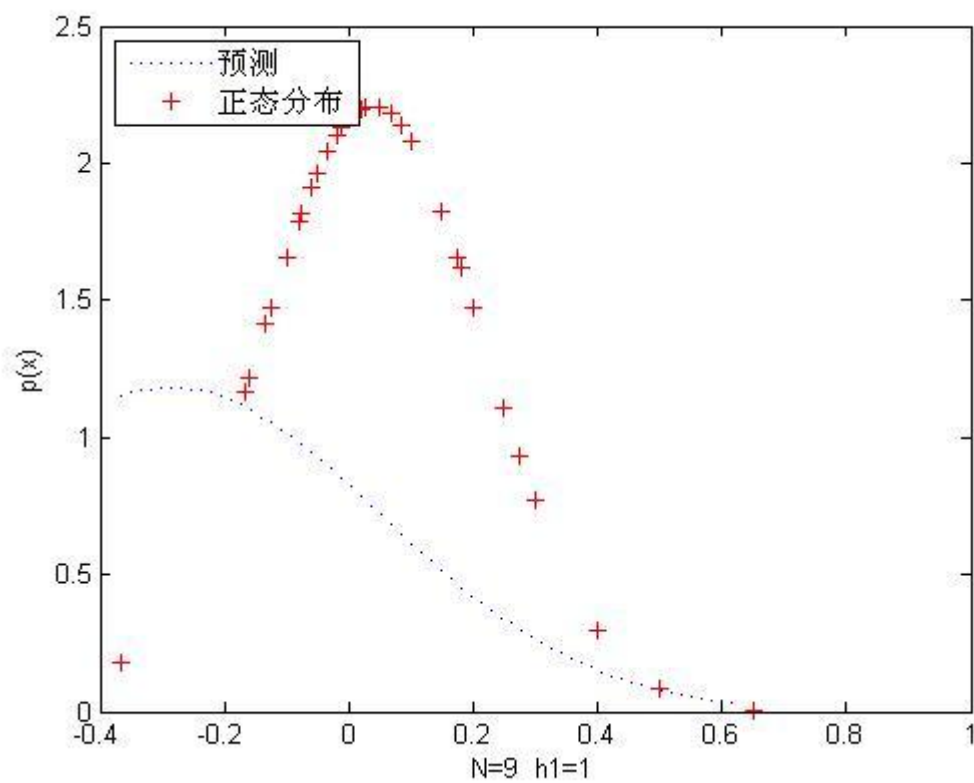


图 4.16 Fe 元素浓度梯度概率密度函数

对概率密度函数积分后得到概率分布函数，函数曲线如图 4.15 实线所示。图 4.15 和图 4.16 中红线部分为传统的基于正态分布假设下得到的元素光谱浓度梯度概率密度函数曲线以及概率分布曲线。可以看出实际的油液监测数据的梯度值也并不完全服从正态分布。

依据界限值制定方法得到该型发动机 Fe 元素光谱浓度梯度界限值：正常限 0.0478；警告限 0.3684；异常限 0.5842。以及假设 Fe 元素服从正态分布的情况下得到的界限值：正常限 2.21；警告限：4.01；异常限：5.82。对于其他元素，同理得到其它界限值,如表 4.2 所示。其中括号中的值为依据正态度分布假设得到的界限值。

表 4.2 发动机主要元素浓度梯度界限值

元素		Fe	Cu	Cr	Ag	Ti	Mg
界限值	正	0.0478	0.2361	0.1230	0.187	0.204	2.739
	常	(0.22)	(0.44)	(0.13)	(0.41)	(0.68)	(4.35)
	警	0.3684	0.3492	0.2074	0.726	0.952	4.797
	告	(0.41)	(0.56)	(0.257)	(0.84)	(1.28)	(8.570)
	异	0.5842	0.3785	0.2244	0.933	1.142	7.359
	常	(0.58)	(0.68)	(0.381)	(1.27)	(1.88)	(12.66)

4.2.2.3 浓度比例界限值的制定

以 Fe 元素为例，采用 Fe/Mg 作为比例模型样本，进行仿真，得到结果如图：

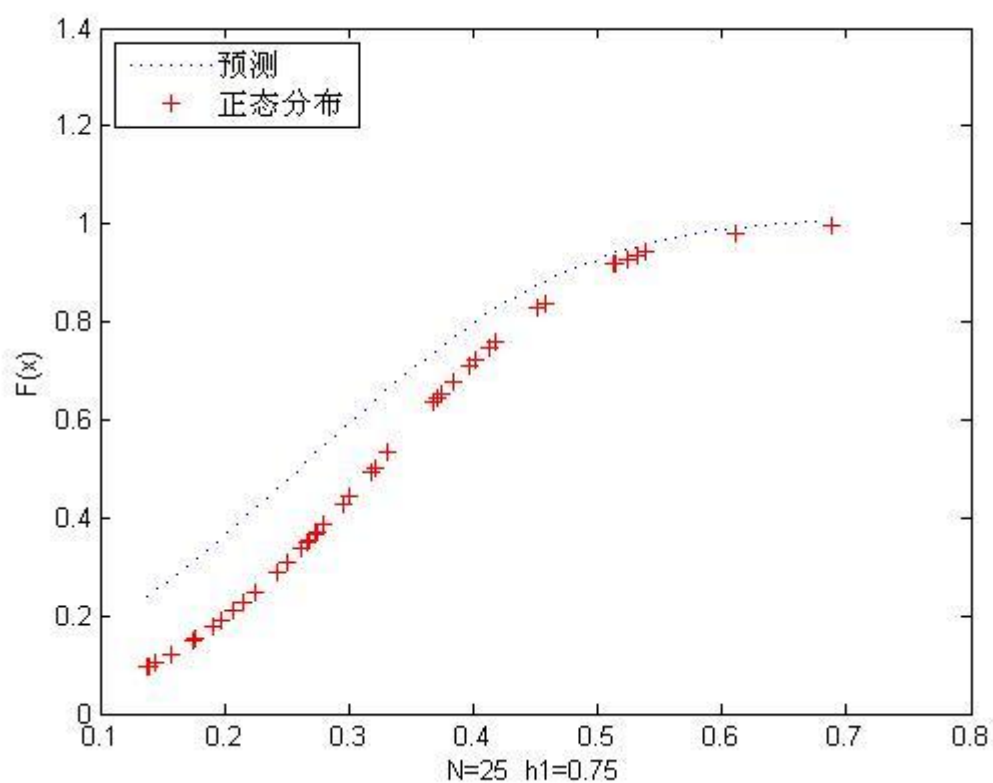


图 4.17 Fe/Mg 浓度比例概率分布

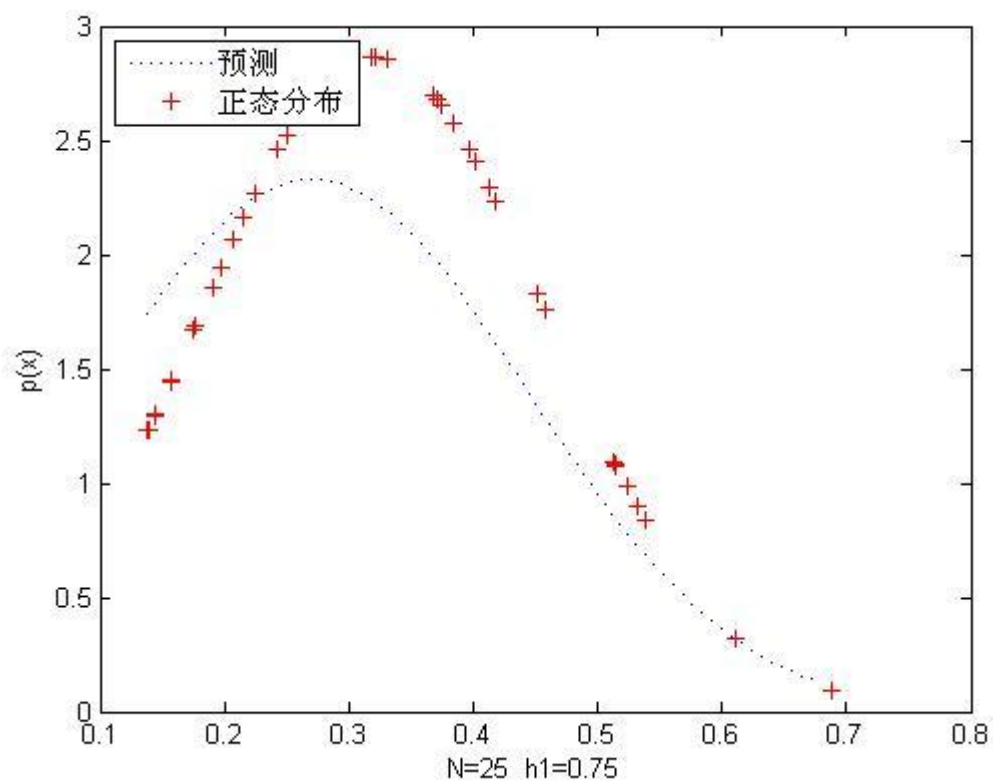


图 4.18 Fe/Mg 浓度比例概率密度函数

(1) 比例上界

设 Fe 元素的光谱数据为 $(x_1, x_2, \mathbf{K}, x_n)$ ，Mg 元素的光谱数据为 $(y_1, y_2, \mathbf{K}, y_n)$ ，首先计算 Fe 元素与 Mg 元素的比例值作为原始数据 D ， $D = (x_1/y_1, x_2/y_2, \mathbf{K}, x_n/y_n)$ ， n 表示数据的个数。首先用 Parzen 求解比例值 D 的概率密度函数以及概率分布函数，曲线图如图 4.17 和图 4.18 所示，在图中，红线表示假定数据服从正态分布的条件下，得到的概率密度曲线和概率分布曲线，可以看出实际的油液监测数据的比例值分布也并不是正态分布。根据制定界限值制定方法，得出 Fe/Mg 元素的正常线的上界：0.4691；警告线的上界：0.5433；异常线的上界：0.5585。

表 4.3 发动机主要元素浓度比例值界限

元素			Fe/Cu	Fe/Cr	Fe/Ag	Fe/Ti	Fe/Mg
界限值	正常线	上	2.81 (2.90)	15.4 (17.0)	16.1 (16.6)	4.77 (4.38)	0.46 (0.62)
		下	1.79 (1.97)	5.28 (6.43)	8.22 (8.93)	2.54 (2.67)	0.28 (0.38)
	警告线	上	3.21 (3.38)	21.5 (22.6)	21.2 (20.7)	5.53 (5.24)	0.54 (0.74)
		下	1.62 (1.71)	3.72 (4.93)	6.12 (7.33)	2.18 (2.24)	0.25 (0.32)
	异常线	上	2.81 (3.87)	26.3 (28.1)	22.8 (24.8)	5.68 (6.11)	0.56 (0.86)
		下	1.38 (1.51)	3.15 (3.99)	4.71 (6.21)	1.83 (1.93)	0.26 (0.28)

(2) 比例下界

对于比例下界，根据实际情况我们通过对 Mg/Fe 比例值的上界取倒数来计算相应 Fe/Mg 的比例值的下界，得出 Fe/Mg 元素的正常线的下界：0.2813；警告线的下界：0.5624；异常线的下界：0.2641。同理得到其它浓度比例界限值，如表 4.3 所示。其中括号中的值为依据正态分布假设得到的界限值。

4.2.3 SVM 的航空发动机界限值分析

4.2.3.1 浓度界限值的制定

以 Fe 元素为例，设样本值为 $x_1, x_2, \mathbf{L}, x_n$ 。采用基于支持向量机的概率密度估计问题，从概率密度的定义出发，求解线性算子方程的解：

$$f(x, b) = \sum_{i=1}^N b_i (\Psi(x_i) \cdot \Phi(t)) = \sum_{i=1}^N b_i k(x_i, x) \quad (4.1)$$

于是得到 Fe 元素光谱概率密度函数为（其中 t 取 4），函数曲线如图 4.2.3.1-1 所示。

$$f(x, b) = \sum_{i=1}^N b_i \frac{t}{2 + e^{t(x_i - x)} + e^{-t(x_i - x)}} \quad (4.2)$$

对 Fe 元素光谱概率密度函数求积分，得到其概率分布函数：

$$F(y) = \int_0^y f(x) dx = \sum_{i=1}^N b_i \int_0^y \frac{t}{2 + e^{t(x_i - x)} + e^{-t(x_i - x)}} dx = \sum_{i=1}^N b_i \frac{e^{tx_i} - e^{t(x_i - y)}}{(1 + e^{t(x_i - y)})(1 + e^{tx_i})} \quad (4.3)$$

分布函数曲线如图 4.19 所示。

图 4.19、图 4.20 中红线部分为传统的基于正态分布假设下得到的元素光谱浓度概率密度函数曲线以及概率分布曲线。从图中可以看出，经 SVM 估计得到的实际油液监测数据并不完全服从正态分布。

考虑到油液监测数据的异常与否只与是否超过数据的上界为依据，并对照经典三线值法给定的范围，做以下规定：定义 $F(y) = \Phi(1)$ （ Φ 为标准正态分布函数），即 $F(y) = 0.8413$ 时的 y 值为系统的正常分界点； $F(y) = \Phi(2)$ ，即 $F(y) = 0.9772$ 时的 y 值为系统的警告分界点； $F(y) = \Phi(3)$ ，即 $F(y) = 0.9987$ 时的 y 值为系统的危险分界点，则：

- ① y 值介于正常分界点以下，即 $F(y) \leq 0.8413$ 时，系统处于正常的运行状态；
- ② y 值介于正常分界点以上，警告分界点以下，即 $0.8413 < F(y) \leq 0.9772$ 时，系统处于应当引起注意的运行状态；
- ③ y 值介于警告分界点以上，危险分界点以下，即 $0.9772 < F(y) \leq 0.9987$ 时，系统处于应当警告的运行状态；
- ④ y 值介于危险分界点以上，即 $F(y) > 0.9987$ 时，系统处于危险的运行状态。

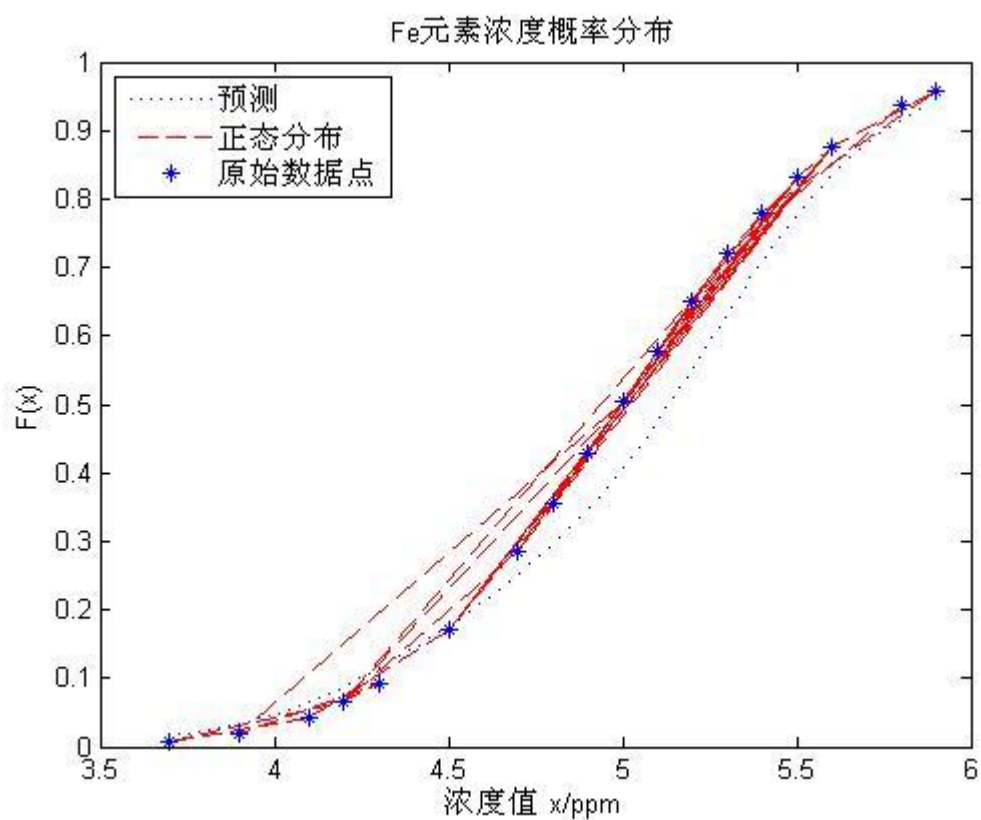


图 4.19 Fe 元素浓度概率分布

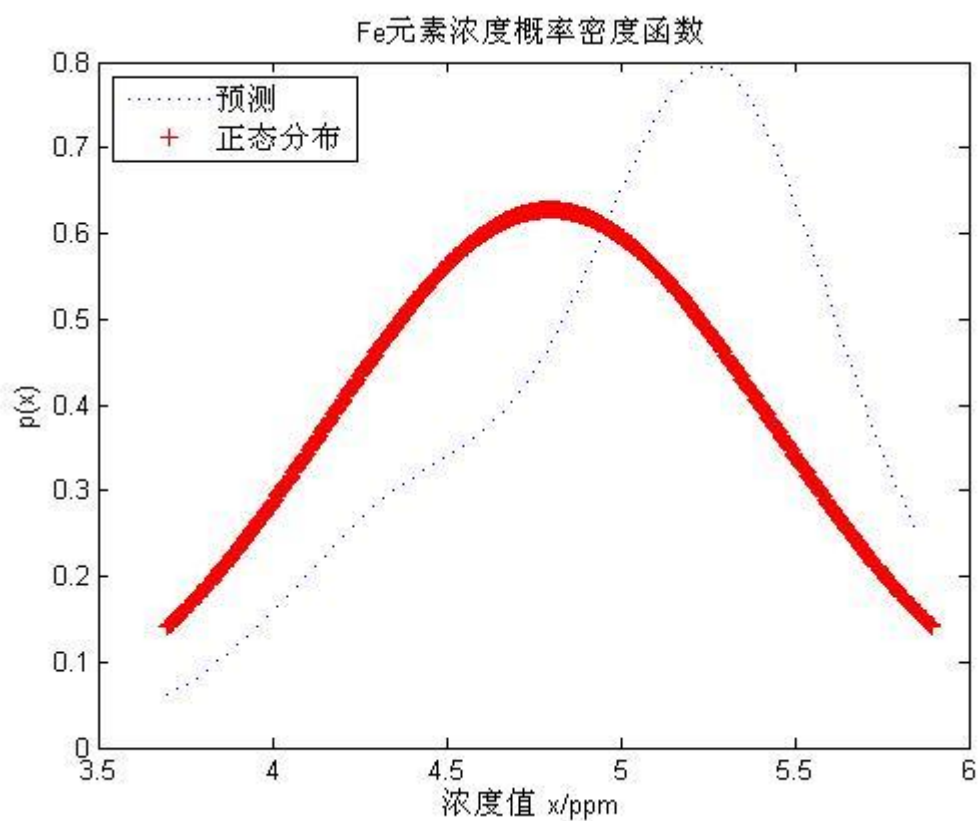


图 4.20 Fe 元素浓度概率密度函数

根据本文对正常分界点、警告分界点和危险分界点的规定得该型发动机 Fe 元素光谱监测诊断标准的三个关键运行状态分界点为：正常限 5.6046；警告限 6.1386；异常限 6.8625。以及假设 Fe 元素服从正态分布的情况下得到的界限值：正常限 5.5196；警告限：6.0435；异常限：6.5674。

对于其他元素，同理可以得到其界限值，如表 4.4 所示，其中括号中的值为依据正态分布假设得到的界限值。

表 4.4 发动机主要元素浓度界限值

元素		Fe	Cu	Cr	Ag	Ti	Mg
界限值	正常	5.60(5.52)	2.69(2.62)	0.88(0.78)	0.63(0.55)	1.89(1.78)	14.02(13.37)
	警告	6.14(6.04)	3.16(3.08)	1.26(1.00)	0.79(0.67)	2.22(2.08)	17.25(16.03)
	异常	6.86(6.57)	3.76(3.55)	1.75(1.256)	1.01(0.79)	2.68(2.37)	21.51(18.70)

4.2.3.2 浓度梯度界限值制定

同样以 Fe 元素为例，利用 SVM 概率密度估计方法计算其浓度梯度界限值。设样本值为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \mathbf{K}, (x_n, y_n)$ ，根据浓度梯度的定义：

$$g_i = \frac{(x_{i+1} - x_i)}{(y_{i+1} - y_i)} \times 10$$

其中， x_i, x_{i+1} 表示相邻两次浓度值， y_i, y_{i+1} 表示相邻两次采集时发动机运行时间。

将 $(g_1, g_2, \mathbf{K}, g_n)$ 作为原始数据，用与求解光谱数据浓度界限值相同的方法。首先用 SVM 估计其概率密度，函数曲线如图 4.21 实线所示。对概率密度函数积分后得到概率分布函数，函数曲线如图 4.22 实线所示。图 4.21 和图 4.22 中虚线部分为传统的基于正态分布假设下得到的元素光谱浓度梯度概率密度函数曲线以及概率分布曲线。可以看出实际的油液监测数据的梯度值也并不完全服从正态分布。

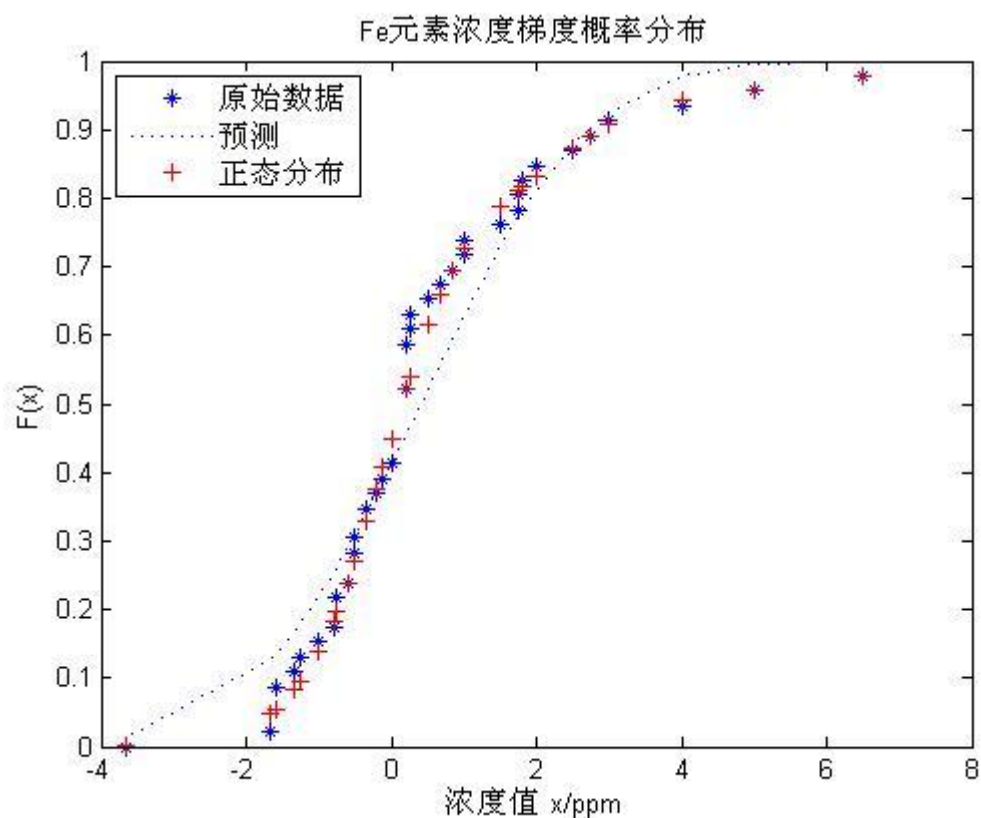


图 4.21 Fe 元素浓度梯度概率分布

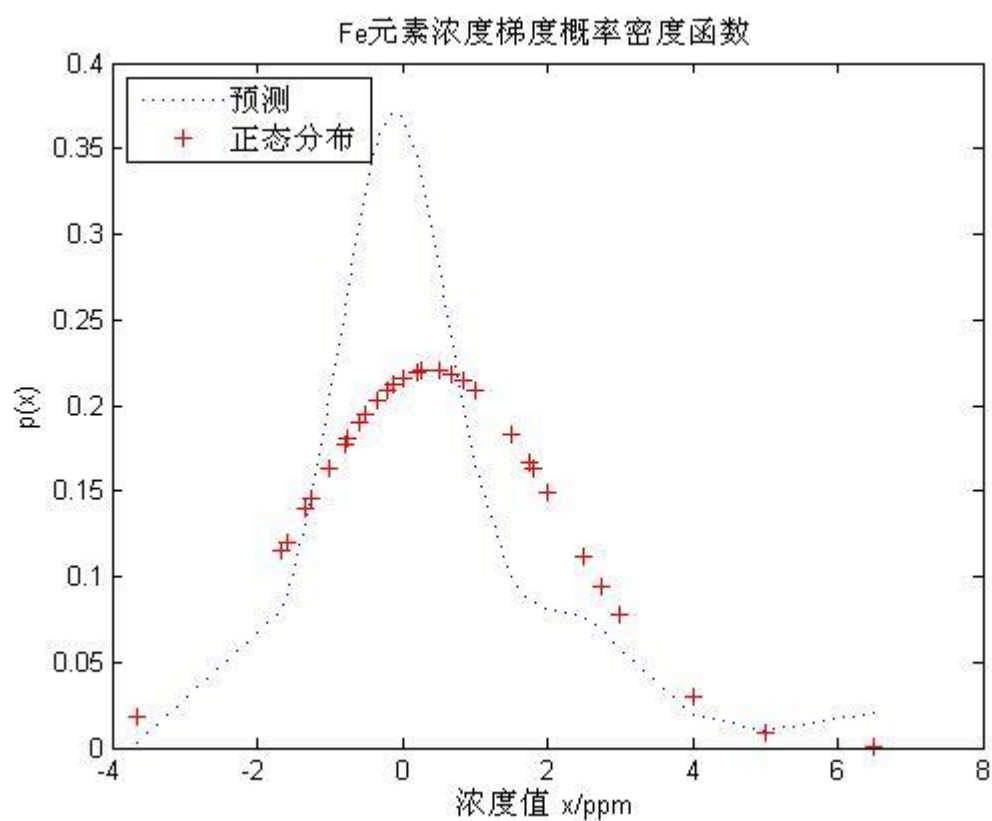


图 4.22 Fe 元素浓度梯度概率密度函数

依据界限值制定方法得到该型发动机 Fe 元素光谱浓度梯度界限值：正常限 0.19315；警告限 0.64035；异常限 0.9075。以及假设 Fe 元素服从正态分布的情况下得到的界限值：正常限 0.2205；警告限：0.40121；异常限：0.58193。对于其他元素，同理得到其它界限值，如表 2 所示。其中括号中的值为依据正态度分布假设得到的界限值。

表 4.5 发动机主要元素浓度梯度界限值

元素		Fe	Cu	Cr	Ag	Ti	Mg
界限值	正	1.93 (2.21)	0.82 (1.14)	1.00 (1.33)	0.35 (0.41)	0.67 (0.68)	2.22 (4.35)
	警	6.40 (4.01)	2.09 (2.08)	4.24 (2.57)	0.60 (0.84)	1.97 (1.28)	4.84 (8.50)
	告	9.08 (5.82)	5.94 (3.01)	5.52 (3.81)	0.94 (1.27)	2.86 (1.88)	8.45 (12.66)

4.3.3.3 浓度比例界限值制定

对于航空发动机油样光谱数据浓度比例界限值的制定，以制定 Fe 元素与 Cu 元素的比例界限值为例。

比例上界

设 Fe 元素的光谱数据为 $(x_1, x_2, \mathbf{K}, x_n)$ ，Cu 元素的光谱数据为 $(y_1, y_2, \mathbf{K}, y_n)$ ，首先计算 Fe 元素与 Cu 元素的比例值作为原始数据 D， $D = (x_1/y_1, x_2/y_2, \mathbf{K}, x_n/y_n)$ ，n 表示数据的个数。首先用 SVM 求解比例值 D 的概率密度函数以及概率分布函数，曲线图如图 4.23 和图 4.24 所示，在图中，虚线表示假定数据服从正态分布的条件下，得到的概率密度曲线和概率分布曲线，可以看出实际的油液监测数据的比例值分布也并不是正态分布。根据制定界限值制定方法，得出 Fe/Cu 元素的正常线的上界：2.9548；警告线的上界：3.7616；异常线的上界：4.62。

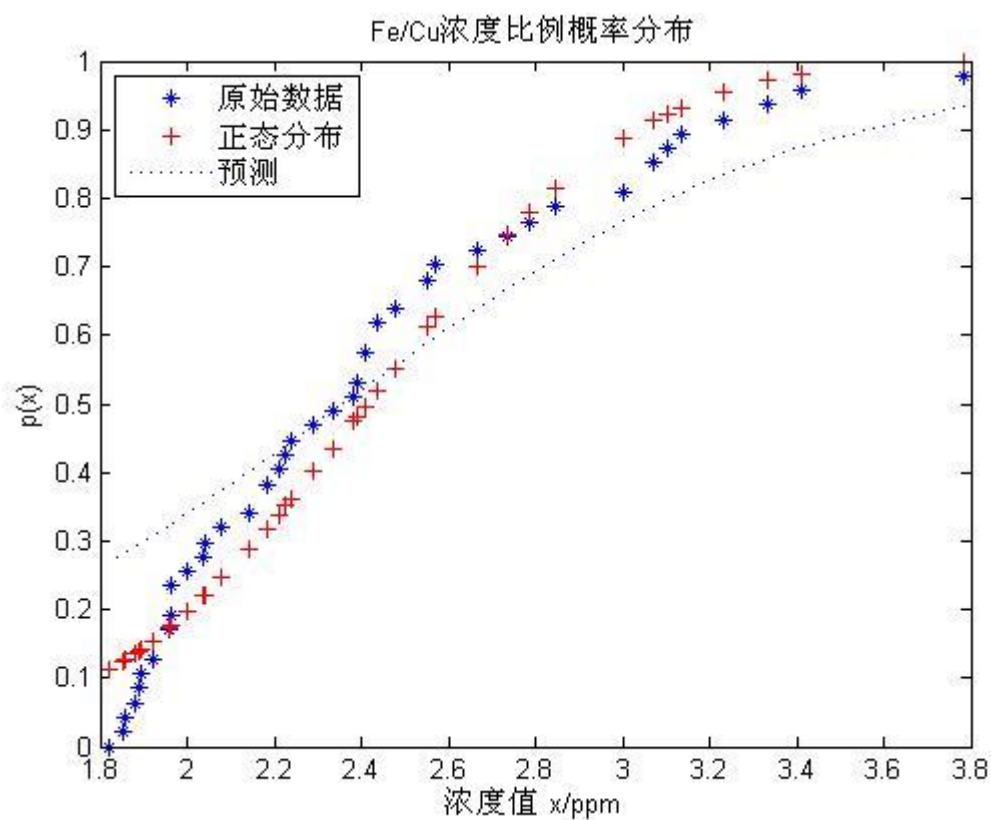


图 4.23 Fe/Cu 浓度比例概率分布

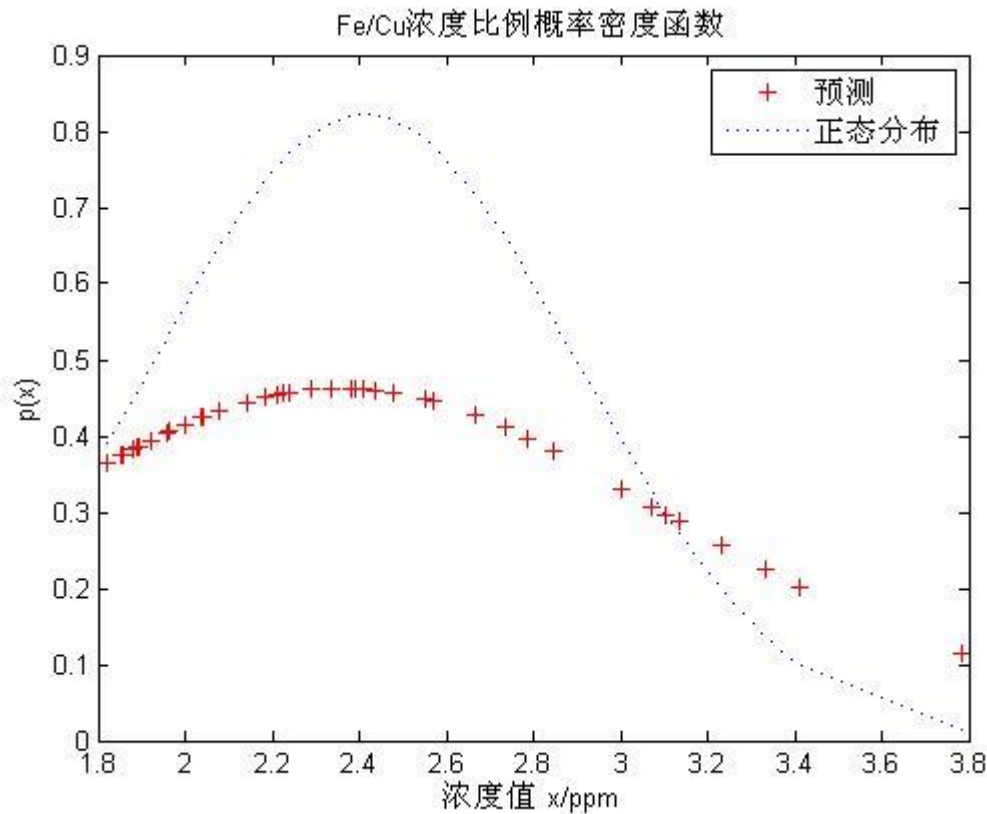


图 4.24 Fe/Cu 浓度比例概率密度函数

表 4.6 发动机主要元素浓度比例值界限

元素			Fe/Cu	Fe/Cr	Fe/Ag	Fe/Ti	Fe/Mg
界限值	正常线	上	2.95 (2.90)	17.4 (17.0)	16.7 (16.6)	4.59 (4.38)	0.64 (0.62)
		下	1.91 (1.97)	6.16 (6.43)	8.52 (8.93)	2.64 (2.67)	0.63 (0.38)
	警告线	上	3.76 (3.38)	27.5 (22.6)	25.4 (20.7)	5.69 (5.24)	0.85 (0.74)
		下	1.65 (1.71)	4.39 (4.93)	6.52 (7.33)	2.08 (2.24)	0.34 (0.32)
	异常线	上	4.62 (3.87)	37.3 (28.1)	29.8 (24.8)	6.90 (6.11)	1.04 (0.86)
		下	1.41 (1.51)	3.25 (3.99)	4.92 (6.21)	1.72 (1.93)	0.26 (0.28)

比例下界

对于比例下界，根据实际情况我们通过对 Cu/Fe 比例值的上界取倒数来计算相应 Fe/Cu 的比例值的下界，得出 Fe/Cu 元素的正常线的下界：1.9069；警告线的下界：1.6532；异常线的下界：1.4108。同理得到其它浓度比例界限值，如表 4.6 所示。其中括号中的值为依据正态分布假设得到的界限值。

4.3.3.4 SVM 方法总结

运用支持向量机进行了概率密度估计，首先利用标准正态分布概率密度函数进行了验证，

表明了方法的正确有效性；然后将这一方法运用到估计油样光谱数据的概率密度函数，根据光谱数据的概率分布求出光谱诊断正常、警告、以及异常界限值。最后，针对实际的航空发动机光谱数据，利用本文基于 SVM 的概率密度函数估计方法制定了航空发动机光谱元素磨损浓度界限值、磨损浓度梯度界限值以及磨损浓度比例界限值，并与传统的基于正态分布假设下所确定的界限值进行了比较分析，结果表明实际的航空发动机光谱元素并不完全服从正态分布假设，通过 SVM 估计得到的界限值应该更真实，更可靠。

第五章 结论与展望

5.1 结论

建立的基于 MATLAB 平台的发动机光谱诊断界限值制定软件，其核心的数学模型是正确的，软件制定的光谱诊断界限值是有效的，而且具有较高的稳定性和准确性，能够有效地应用于各种机械设备的油液检测的故障诊断中。

不同的机械设备具有不同的磨损特征元素，因此，在石油本软件进行光谱诊断界限值制定时，应对机械设备的磨损特征元素进行分析和确定。

5.2 发展与展望

光谱诊断技术应用已十分广泛，基于 MATLAB 平台的仿真应用也有很多实例。本文采用的 3 种数学模型中，Kn-近邻估计和 Parzen 窗估计是传统的参数估计，受样本的约束条件比较大，拟合的函数分布和概率密度效果也不是很好。而非参数的 SVM 方法求得的概率密度可以很好的逼近实际概率密度，并在相应的分布估计算法中取得了较好的效果。但是对于高维的情况还是需要进一步的研究。

制定界限值既离不开数学，又非纯数学问题。因不同机器的磨损规律有不同特征，需要对已制定的界限值在实际应用中根据诊断准确率的经验，设置合理的置信度去调整。

单技术的仪器，捕捉故障信息总有局限性，近代出现的多技术的仪器，可以捕捉和揭示多方面的征兆。多技术油液分析的信息融合，至今还无突破性的应用进展。此外，多技术分析中，有几类的定量分析和定性分析，如何分别去制定界限值，包括理论和经验等，这些信息处理问题，还需深化研究。

参考文献

- [1] 李柱国。机械润滑与诊断[M]。北京：化学工业出版社，2005
- [2] Vapnik V N。统计学习理论的本质[M]。张学工译。北京：清华大学出版社。2000
- [3] 任国全，张培林，张英堂。装备油液智能监控原理[M]。北京：国防工业出版社，2006
- [4] 陈果。航空器检测与诊断技术导论[M]。北京：中国民航出版社，2007
- [5] 万耀青，郑长松，马彪。多技术油液分析故障诊断的界限值问题[J]
- [6] 万耀青，郑长松，马彪。原子发射光谱仪作油液分析光谱诊断的界限值问题[J]。机械强度。2006,28（4）：485~488
- [7] 张焰，张素，章琛曦，陈亚珠，基于支持向量机的概率密度估计方法[J]。系统仿真学报。2005
- [8] 徐玉兵，谭瑛，曾建潮，张建华。基于 SVM 的概率密度估计及分布估计算法[J]。计算机与数字工程
- [9] 张翔，肖小玲，徐光佑。基于最大熵估计的支持向量机概率建模[J]。控制与决策
- [10] 朱焕勤，张子阳，张永国，费逸伟，李威。某型飞机发动机润滑油光谱分析界限值制定方法研究[J]。润滑与密封
- [11] 程瑞琪，崔建军。内燃机车机油光谱数据特征分析与故障诊断[J]。机械科学与技术，2009，19（2）：289~294
- [12] 高经纬，张培林，张英堂，任国全，模型柴油机磨损特点及油液光谱分析诊断研究[J]。内燃机学报，2004,22（6）：571~576
- [13] 霍宇翔。基于光谱有聊分析的磨损状态监测[博士学位论文]。北京：清华大学，1993
- [14] 马璐。柴油机光谱油料分析故障诊断与专家系统的研究与实践[博士学位论文]。北京：北京理工大学，1993
- [15] 高经纬，张培林，任国全，李兵，油液光分析比例模型的建立[J]。内燃机工程，2004,25（6）：34~37
- [16] 高经纬，张培林，任国全，李峰。油液光谱分析故障诊断专家系统知识库的设计与实现[J]。润滑与密封，2004，(3):96~97
- [17] 宋兰琪，汤道宇，陈立波，毛美娟。基于油液光谱分析的发动机故障诊断专家系统研究 [J]。航空学报，2000,21（5）：453~457
- [18] 李韶辉，付集新，张冶。船舶机械油液检测光谱分析的特诊参数研究[J]。润滑与密封，2004，（11）：92~93
- [19] 付建平，张培林，李国章，廖振强。基于光谱信息融合的发动机磨损状态监测[J]。润滑与密封，2004，（11）：92~93
- [20] 郑长松，马彪，万耀青，周凯。油品对定型产品台架寿命试验的研究与应用[J]。中国机械工程，2006,17（9）：975~978
- [21] Hua Huo,Zhuguo LI,Yangchun Xia. Application of maximum entropy probability density estimation approach to constituting oil monitoring diagnostic criterions. Received 3 March 2004; accepted 6 January 2005 Available online 13 June 2005

致谢

本文是在陈果老师的悉心指导下完成的，从论文的选题，软件的开发到论文的撰写，陈老师都给予了我极大地指导与支持。在这三个月的毕设过程中，在学术思想和科研态度及方法上，陈老师对我严格要求，给我提供了充足的动手和动脑机会，并不断鼓励我们做事要精益求精，善于思考，敢于创新，感激之余，让我知道自己的求知道路还很长，要上下而求索之。陈老师渊博的学识，严谨的学术态度，先锋的创造精神，孜孜不倦的工作情怀以及他的平易近人，细微关怀，乐观积极的人生态度都使我受益匪浅，在此，向陈老师致以衷心的感谢！

同时，在系统的编制和论文的撰写过程中，还要感谢陈老师的研究生李爱学姐，她给了我很大的关怀与支持。她的友好，善良，坦诚，睿智都在毕设过程中给了我莫大的精神慰藉，让我满怀感动，不断前进。

感谢民航学院的老师们在我们四年的大学生活中的谆谆教诲和辛苦付出！

感谢母校——南京航空航天大学为我们的成长与成才所提供的一切！

附录