# 多组分碳氢燃料 RP-3 导热系数实验

周海鹏 闻 洁 邓宏武 贾洲侠

(北京航空航天大学 航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100191)

**摘 要**: 基于经典的瞬态热线法原理,设计研制了一种适用于高温高压条件下测量多组分碳氢燃料导热系数的实验装置. 对无水乙醇、甲苯及高压氮气进行了标定,结果表明液相导热系数最大偏差在 1% 以内,气相导热系数最大偏差在 3% 以内. 进而对国产碳氢燃料 RP-3 导热系数进行了测定,温度范围 298 ~ 430 K,压力范围 0.1 ~ 5 MPa. 改进和完善了超临界压力下流体导热系数的测量方法.

**关 键 词**: 瞬态热线法; 碳氢燃料; RP-3; 热物性; 导热系数

**中图分类号**: V 312

**文献标识码**: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2013)10-1387-05

# Experiment of multi-component hydrocarbon fuels RP-3 thermal conductivity

Zhou Haipeng Wen Jie Deng Hongwu Jia Zhouxia

(National Key Laboratory on Aero-Engines, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract**: Based on the classic trasient hot-wire princeple, the experiment apparatus for the measurement of multicomponent hydrocarbon fuel thermal conductivity under high temperature and high pressure was introduced. The calibration results of absolute ethyl alcohol, toluene and high pressure nitrogen show that the maxmum deviation for liquid thermal conductivity is less than 1% and for gas is less than 3%. After that, conductivity of domestic hydrocarbon fuel RP-3 was measured under 298 ~ 430 K and 0.1 ~ 5 MPa using this apparatus and the results show a good repeatibility. It is of great importance to improve conductivity measuring mehtods for fluid under super-critical pressure.

**Key words**: transient hot-wire; hydrocarbon fuels; RP-3; thermophysical properties; thermal conductivity

未来先进航空发动机其涡轮前温度的升高,大大增加了涡轮叶片等高温部件的热负荷,同时进气增压比升高将导致冷却空气冷却品质的下降.

为了满足增压比和涡轮前温度持续提高的需求,在继续研究新型冷却结构的同时,有学者提出了以航空煤油作为冷却介质来冷却空气的 CCA (Cool Cooling Air)[1] 技术,冷却空气的冷却能力得到提升,航空煤油的燃烧和雾化效果也得到提升,前景广阔. 但是作为冷源的航空煤油成分是相当复杂的,同纯物质有很大的差别,而且可靠的航空煤油热物性参数是极其缺乏的,热物性参数基础数据对于研究 RP-3 航空煤油流动换热以及建立工程模型有着极其重大的意义. 张春本等人已经对国产航空煤油 RP-3 热物性参数进行比较细致的研究,目前已获得临界温度645.04 K,临界压力 2.33 MPa,比热容,焓值,密度,粘度的热物性实验数据.

导热系数作为流体重要的热物性参数之一表征了物质导热能力的大小,在很多领域有着重要

**收稿日期**: 2012-12-25; **网络出版时间**: 2013-07-23 16:54

**网络出版地址**: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20130723.1654.004.html

**基金项目**: 国家自然科学基金资助项目(50676005)

**作者简介**: 周海鹏(1985-),男,山东聊城人,硕士生,zhiphappier@163.com.

的应用,是很多工程设计所必须的基础数据之一. 导热系数的获得有理论模拟计算和实验两种方法,但是航空煤油组分非常复杂,很难找到一个很好的理论模型来模拟计算多组分煤油的导热系数,而且在高温条件下会发生化学反应,组分发生变化. 因此实验方法是获得煤油导热系数的主要选择.

导热系数实验方法主要可分为稳态法和瞬态法,稳态实验方法模型简单,精度高,但是严格达到其要求的边界条件很困难,而且测量时间比较长,特别是流体具有流动性,不能消除自然对流的影响. 瞬态法测量时间短、精度高,可有效消除自然对流的影响.

## 1 实验原理

瞬态热线法是公认的测定液体或气体导热系数最好的方法,作为瞬态实验方法,它具有测试精度高,测量过程温差小,辐射面积小,有效减小对流的影响等显著特点. 其物理模型是在无限大空间放置一段直径极微小的细丝作为线热源,待温度场恒定时,突然对其加一恒定的阶跃电流,铂丝通电发热同时加热周围流体,在短时间内可以认为是纯导热过程,铂丝的温度和其紧贴的流体温度相同,因此测定实验过程中 $T$-$t$ 的相关变化关系,从而得到待测液体的导热系数. 作为经典的测定导热系数的方法,国内外很多学者[2-9]都进行了大量工作.

一维非稳态线热源导热微分方程[2-3]为

$$\frac{\partial\theta}{\partial\tau}=\alpha\left(\frac{\partial^2\theta}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial\theta}{\partial r}\right) \tag{1}$$

$$\theta=\theta(r,\tau)=\Delta T(r,\tau)=T(r,\tau)-T_0$$

式中,$\theta$ 是过余温度;$\alpha$ 是流体的热扩散系数.

初始边界条件:

$$\Delta T(r,\tau)=0 \quad \tau=0$$

$$\lim_{r\to 0}\lambda\frac{\partial\Delta T(r,\tau)}{\partial r}=\frac{q}{2\pi r} \quad \tau>0$$

$$\lim_{r\to\infty}\Delta T(r,\tau)=0 \quad \tau\geqslant 0$$

式中,$\lambda$ 为待测流体导热系数;$q$ 为铂丝单位长度的加热功率.

假设铂丝表面 $r_0$ 处的温度与接触的流体温度相同. 忽略无穷小项,可解得

$$\Delta T(r_0,\tau)=\frac{q}{4\pi\lambda}\ln\frac{4\alpha\tau}{r_0^2C} \tag{2}$$

$$\lambda=\frac{q}{4\pi}\Big/\frac{\mathrm{d}\Delta T}{\mathrm{d}(\ln\tau)} \tag{3}$$

式中,$\Delta T(r_0,\tau)$ 为理想条件下铂丝的温升;$C=\exp(\gamma)$;$\gamma$ 为欧拉常数(其值为 0.577 215 7…).

式(3)即是经典瞬态热线法求解导热系数的基本公式. 因此知道了单位长度的加热功率 $q$,温升对时间自然对数的斜率就可以求得流体的导热系数.

实验的参考温度为铂丝温升后的修正温度[4],按式(4)计算:

$$T=T_0+(\Delta T_1+\Delta T_2)/2 \tag{4}$$

式中,$\Delta T_1$ 是初始测试点温升;$\Delta T_2$ 是结束点温升.

## 2 测试系统

本系统由电路系统、数据采集系统、铂丝装置、温控压力腔体组成.

### 2.1 电路与数据采集系统

非平衡电桥是最常见的微小信号调理电路之一,可以广泛用作测量信号的转换,电路图设计见图 1,测量桥路上的不平衡电压值,电桥把铂丝温度信号转换成可测的电信号.

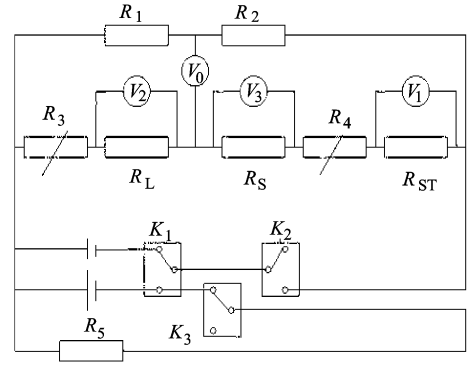



图 1 电路与数据采集系统图

为了消除铂丝的端部影响,本实验采用瞬态双线法,即采用长短不同的两根铂丝串联,保证流过长短铂丝的电流相同,单位长度的线加热功率相同. 初始时刻调节 $R_3$,$R_4$ 使桥路平衡,当给电路加一定的阶跃电流,相应的铂丝电阻发生变化,从而使桥路失去平衡,实时监测桥差. $R_1$,$R_2$,$R_{ST}$ 均是 RX70 军工级高精密电阻,精度可达到 0.01%. $R_1$,$R_2$ 阻值均为 200 Ω,$R_{ST}$ 阻值为 1 Ω. 监测 $R_{ST}$ 上电压即可得到通过铂丝电流. $R_3$,$R_4$ 为可调变阻箱 RX74,步进值为 0.001 Ω,精度 0.01%. $R_L$,$R_S$ 为长短铂丝电阻,电阻 $R_5$ 的作用是稳定电路电源电压. $K_1$,$K_2$,$K_3$ 为电路转换开关. 电源采用北京 RIGOL 的 DP1308A,其出色的负载调节率和线性调节率满足本实验要求. 电桥可分为恒压源电桥和恒流源电桥,但是恒流源电桥明显可以减少非线性误差[10],因此采用恒流源供电的长短丝串联

电路.

数据采集系统经过对比选型,采用研华 12 位 PCI 总线接口的多功能高增益数据采集卡 PCI-1710HG,它有 16 路单端或 8 路差分模拟量输入或组合方式输入. 采用图形化编程语言 labview 编写了数据采集程序,编写 4 路差分通道,其中不平衡电压通道 $V_0$,增益 1 000,输入量程±5 MV 时精度为 FSR 的 0.08% ± 1 LSB,也就是 0.1%. 定值电阻 $R_{ST}$上通道 $V_1$,采集电压值即是通过长短铂丝的电流. 同时监测长短铂丝两端的电压 $V_2$,$V_3$. 每个通道可以单独控制增益,每个通道采集频率均为 1 000 Hz,实行高速采集,完全满足实验的需要.

$$\mathrm{d}U = \frac{(R_3 + R_L + \mathrm{d}R_L)E}{R_3 + R_L + R_S + R_4 + R_{ST} + \mathrm{d}R_L + \mathrm{d}R_S} - \frac{E}{2} = \frac{I}{2}\mathrm{d}R_X \tag{5}$$

铂丝电阻随温度关系:

$$R = R_0(1 + \alpha T) = R_0 + \mu T \tag{6}$$

式中 $\alpha$ 为电阻温度系数 0.003 85,得

$$\mathrm{d}R = \mu \mathrm{d}T$$

将式(5)、式(6)代入式(3)得

$$\lambda = \frac{q}{4\pi}\Big/\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}(\ln\tau)} = \frac{\mu I^3 R_X}{8\pi L_X}\Big/\frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}(\ln\tau)} \tag{7}$$

式(7)即是本导热系数测试系统的最终计算公式.

### 2.2　铂丝装置和温控压力腔体系统

其主体部分是不锈钢外壳,对半的壳体中有两柱形通道,而铂丝就在这个柱形通道内. 采用焊接的方式焊接在拉紧弹簧和金属导电柱上,再采用固定块和滑动块的支撑来解决整个铂丝的固定与微调拉直问题. 这样可以保证铂丝的拉直,并与金属外壳良好绝缘,又与外接导线导电良好,安装非常方便.

系统恒温反应釜设计压力 7 MPa. 压力腔体主体材料是不锈钢材质 OCr18Ni9,其中长短铂丝部分设计在弹体内. 釜内不同位置布置 4 只经过标定的 $\Phi$=0.1 mm 的 I 级 K 型热电偶. 压力通过一台 Rosemount 3051CA4 压力变送器测量. 待釜内压力恒定,4 只热电偶温度恒定且温度波动小于 0.05 K/min,开始实验. 采用的铂丝名义直径为 15 μm,纯度大于 99.9%,长度约为 70 mm 和 30 mm左右,铂丝更细可以对温度变化响应更灵敏,也可以减小半径带来的实验误差. 铂丝装置示意图如图 2 所示.

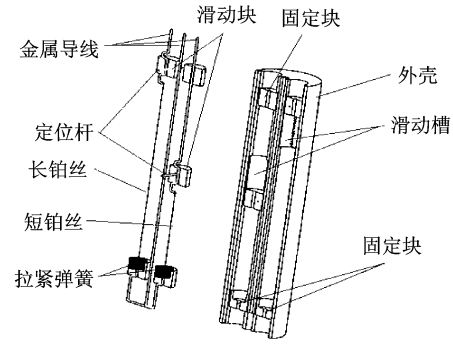



图 2　铂丝装置示意图

## 3　系统不确定度与标定

由式(7)得到导热系数测量的误差:

$$\left|\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right| = 3\left(\left|\frac{\Delta U_1}{U_1}\right| + \left|\frac{\Delta R_{ST}}{R_{ST}}\right|\right) + \left|\frac{\Delta R_X}{R_X}\right| + \left|\frac{\Delta\mu}{\mu}\right| + \left|\frac{\Delta L_X}{L_X}\right| + \left|\frac{\Delta(\mathrm{d}U/\mathrm{d}(\ln\tau))}{\mathrm{d}U/\mathrm{d}(\ln\tau)}\right| \tag{8}$$

其中

$$\frac{\Delta U_1}{U_1} \leqslant 0.06\%$$

$$\frac{\Delta R_{ST}}{R_{ST}} \leqslant 0.01\% \qquad \frac{\Delta R_X}{R_X} \leqslant 0.02\%$$

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} \leqslant 0.06\% \qquad \frac{\Delta L_X}{L_X} \leqslant 0.025\%$$

$$\frac{\Delta(\mathrm{d}U/\mathrm{d}(\ln\tau))}{\mathrm{d}U/\mathrm{d}(\ln\tau)} \leqslant 0.6$$

测量受温度和偏离瞬态热线理论模型影响误差≤2.1%,因此本测量系统的最大不确定度为 3.015%.

本实验系统对常温常压无水乙醇(北京化工厂生产,分析纯,质量分数≥99.7%);常压,温度区间(293.5 ~ 355.3 K)甲苯(北京化工厂生产,分析纯,质量分数≥99.5%);5 MPa,温度区间(323.15 ~ 485.37 K),高纯氮气(99.99%)进行了标定. 并把相应的实验结果与文献[11-13]进行比较.

标定实验数据及标准值如表 1 所示.

**表 1　标定实验数据及标准值**

| 标定物质 | $T$/K | $P$/MPa | $\lambda_{exp}$/(W·m$^{-1}$·K$^{-1}$) | $\lambda_{ref}$/(W·m$^{-1}$·K$^{-1}$) | 误差/% |
|---|---|---|---|---|---|
| 乙醇 | 290.17 | 0.1 | 0.168 1 | 0.167 7 | 0.24 |
| 甲苯 | 293.51 | 0.1 | 0.132 2 | 0.132 5 | -0.23 |
| | 314.40 | 0.1 | 0.127 2 | 0.126 1 | 0.87 |
| | 335.32 | 0.1 | 0.120 6 | 0.119 9 | 0.58 |
| | 355.36 | 0.1 | 0.114 0 | 0.114 3 | -0.26 |
| 氮气 | 336.17 | 5.0 | 0.030 5 | 0.030 9 | -1.3 |
| | 386.67 | 5.0 | 0.031 5 | 0.032 1 | -1.9 |
| | 485.37 | 5.0 | 0.039 0 | 0.037 9 | 2.9 |

以上结果可以得出,无水乙醇和甲苯液相导热系数实验值和文献值最大偏差为 0.87%,标准偏差 0.25%. 氮气气体分子受温度影响变化剧烈,因而表现出了偏差大的现象,最大偏差为 2.9%,标准偏差 1.23%,均具有较高的精度. 说明本实验系统测试数据是非常可靠的,可以很好测定未知流体的导热系数值.

## 4 采集曲线分析

图 3 即为加热电流 25 mA,实验时间 30 s 的实验曲线. 前期为初始段,对电桥施以 1 ~2 mA 小电流,同时打开 $R_5$ 回路,调节 $R_3$,$R_4$ 至电路平衡,然后迅速转换电流回路,得到实验段不平衡电压随时间变化曲线. 可见,电路平衡破坏后,不平衡电压阶跃性地瞬间增大,整个过程实行高速采集,尽管采取了抗干扰措施,但是还是不可避免地受到外界的高频干扰. 取 25 s 左右数据局部放大得到图 4. 很明显地可以看出,两个波谷之间的时间间隔大约是 0.02 s,有理由相信这是受到了交流工频 50 Hz 的影响,文献[14]采用移动平均滤波方法,滤波后的曲线明显更平滑,有利于分析.

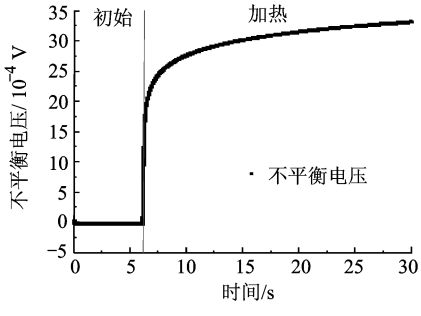



图 3 实验过程曲线

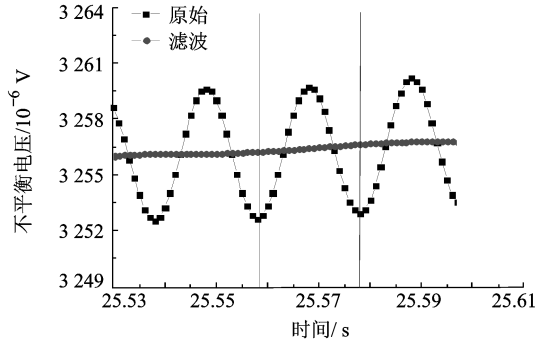



图 4 局部放大图

## 5 RP-3 导热系数的测定

本文继续对 RP-3 的导热系数进行了测定,压力 0.1 ~5 MPa,温度 298 ~430 K,采用固定压力,逐步升温的方法,每个状态点采用相同的加热功率,相同条件下重复 10 次,取其平均值. 每个点的定性温度采用公式(4)的计算值. 经平均后,并对每个压力下导热系数随温度变化数据进行拟合,表 2 是 RP-3 导热系数随温度压力变化的拟合数据. 图 5 是不同压力下 RP-3 导热系数随温度的变化关系图.

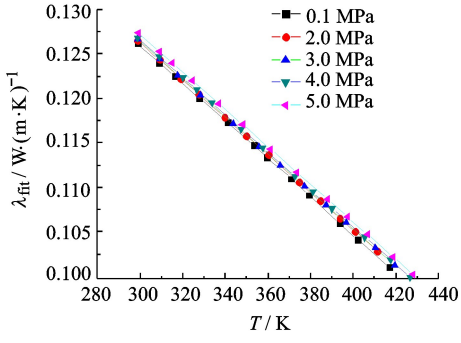



图 5 RP-3 导热系数随温度压力的变化

**表 2 RP-3 各压力下导热系数实验值**

| $P$/MPa | $T$/K | $\lambda$/(W·m$^{-1}$·K$^{-1}$) | $T$/K | $\lambda$/(W·m$^{-1}$·K$^{-1}$) | $T$/K | $\lambda$/(W·m$^{-1}$·K$^{-1}$) | $T$/K | $\lambda$/(W·m$^{-1}$·K$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.1 | 298.74 | 0.1262 | 327.73 | 0.1201 | 359.68 | 0.1133 | 393.71 | 0.1059 |
| | 309.07 | 0.1240 | 341.01 | 0.1173 | 371.05 | 0.1110 | 402.09 | 0.1041 |
| | 316.4 | 0.1224 | 353.39 | 0.1147 | 379.28 | 0.1091 | 416.84 | 0.1010 |
| 2 | 298.81 | 0.1265 | 327.46 | 0.1205 | 360.18 | 0.1136 | 393.75 | 0.1065 |
| | 308.98 | 0.1244 | 339.7 | 0.1179 | 374.47 | 0.1106 | 401.14 | 0.1050 |
| | 319.22 | 0.1222 | 349.94 | 0.1158 | 384.66 | 0.1085 | 411.38 | 0.1028 |
| 3 | 298.87 | 0.1266 | 328.27 | 0.1204 | 365.86 | 0.1125 | 396.85 | 0.1060 |
| | 309.25 | 0.1244 | 343.65 | 0.1172 | 377.23 | 0.1101 | 410.35 | 0.1032 |
| | 317.76 | 0.1226 | 355.93 | 0.1146 | 387.53 | 0.1080 | 419.73 | 0.1012 |
| 4 | 298.91 | 0.1268 | 326.56 | 0.1210 | 357.72 | 0.1144 | 390.23 | 0.1076 |
| | 308.9 | 0.1247 | 333.84 | 0.1194 | 372.86 | 0.1112 | 405.57 | 0.1044 |
| | 320.06 | 0.1223 | 347.54 | 0.1166 | 381.09 | 0.1095 | 417.66 | 0.1018 |
| | | | | | | | 426.82 | 0.0999 |
| 5 | 298.98 | 0.1274 | 324.55 | 0.1220 | 361.37 | 0.1143 | 397.44 | 0.1067 |
| | 309.11 | 0.1252 | 336.82 | 0.1194 | 373.63 | 0.1117 | 406.71 | 0.1047 |
| | 315.28 | 0.1239 | 348.09 | 0.1170 | 388.17 | 0.1086 | 418.98 | 0.1021 |
| | | | | | | | 428.25 | 0.1002 |

## 6　结 束 语

本文根据瞬态双线法原理研制了一整套测试流体导热系数的实验装置,并对已知导热系数物质进行标定,结果表明本实验装置有良好的精度.对未知 RP-3 导热系数测量中,与大多数流体一样,其导热系数随温度的升高而减小,随压力升高而升高.压力小于5 MPa 时,导热系数主要是受温度的影响.实验过程也为 RP-3 的后续高温高压测量提供了很多参考.

### 参考文献(References)


[1] Bruening G B, Chang W S. Cooled cooling air systems for turbine thermal management [R]. ASME Paper 1999-GT-14, 1999

[2] Healy J J, De Groot J J, Kestin J. The theory of the transient hot-wire method for measuring thermal conductivity [J]. Physica, 1976, 82C: 392-408

[3] Carslaw H S, Jaeger J C. Conduction of heat in solids[M]. 2nd ed. London: Oxford University Press, 1959, 510

[4] Wakeham W A, Nagashima A, Sengers J V. Experimental thermo dynamics, volume III: measurement of the transport properties of fluids[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1991

[5] Yan Qiuhui, Liu Zhigang, Yin Jianmin. On the thermal conductivity coefficient of fluid by the transient hot-wire technique [J]. J Xi'an Univ of Arch & Tech, 1997, 29(3): 322-325

[6] Wang Yugang, Wu Jiangtao, Liu Zhigang. Thermal conductivity of dimethyl ether in saturated liquid phase [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(9): 1026-1029

[7] Shi Lin, Liu Xiaojun, Duan Yuanyuan. Transport properties of 1, 1, 1, 2, 3, 3, 3-heptafluoropropane (HFC-227ea) [J]. Tingshua Univ: Sci & Tech, 2001, 41(6): 81-84

[8] Zhang Hongwu, Pan Jiang, Wang Yugang. Development of experimental systems for measurement of liquid thermal conductivity by the transient hot-wire technique [J]. Journal of China University Metrology, 2010, 21(4): 283-288

[9] Liu Ming, He Chaohong, Huang Zhiyao. Measurement of thermal conductivity for systems of methyl ethyl ketoxime with methyl ethyl ketone and n-hexane separately[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2011, 25(4): 547-553

[10] Ni Xinlei. Research on output characteristic research of unbalanced bridge[J]. College Physics, 2009, 28(3): 33-35

[11] Liu Gaungqi, Ma Lianxiang, Liu Jie. Handbook of chemistry and chemical property data [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002

[12] Ramires M L V, Nieto de Castro C A, Perkins R A, et al. Reference data for the thermal conductivity of saturated liquid toluene over a wide range of temperatures[J]. J Phys Chem Ref Data, 2000, 29(2): 133-139

[13] Stephan K, Krauss R. Viscosity and thermal conductivity of nitrogen for a wide range of fluid States[J]. Jphy Chem Ref Data, 1987, 16(4): 993-1023

[14] Song Shoupeng. Digital filter design and application [M]. Zhenjiang: Jiangsu University Press, 2009: 182


(编　辑:张　嵘)

(上接第 1380 页)

### 参考文献(References)


[1] Aitchison J. The statistical analysis of compositional data[M]. London: London Chapman and Hall, 1986

[2] Filzmoser P, Hron K. Outlier detection for compositional data using robust methods[J]. Mathematical Geoscience, 2008, 40: 233-248

[3] Kovacs L O, Kovacs G P, Martin-Fernandez J A, et al. Major-oxide compositional discrimination in Cenozoic volcanites of Hungary[C]//Buccianti A, Mateu-Figueras G, Pawlowsky-Glahn V. Compositional data analysis in the geosciences: from theory to practice. London: Geological Society, 2006: 11-23

[4] Filzmoser P, Hron K, Templ M. Discriminant analysis for compositional data and robust parameter estimation[J]. Computation Statistics, 2012, 27: 585-604

[5] 郭丽娟. 多元成分数据的若干分析方法研究[D]. 北京:北京航空航天大学经济管理学院, 2011
Guo Lijuan. Methods of Multivariate analysis on compositional data[D]. Beijing: School of Economics and Management, Beijing University of Aeronawtics and Astoonantics, 2011(in Chinese)

[6] Aitchison J, Egozcue J J. Compositional data analysis: where are we and where should we be heading? [J]. Mathematical Geology, 2005, 37(7): 829-850

[7] Palarea-Albaladeio J, Martin-Fernandez J A, Soto J A. Dealing with distances and transformations for fuzzy C-means clustering of compositional data[J]. Journal of Classification, 2012: 29: 144-169

[8] Aitchison J. The one-hour course in compositional data analysis or compositional data analysis is simple[C]//Proceedings of IAMG'97-The 1997 Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology. Barcelona: CIMNE, 1997: 3-35

[9] Martin-Fernandez J A, Barcelo-vidal C, Pawlowsky-Glahn V. A critical approach to non-parametric classification of compositional data[C]//Rizzi A, Vichi M, Bock H H. Advances in data science and classification. Berlin: Springer, 1998: 49-56

[10] Pawlowsky-Glahn V, Buccianti A. Compositional data analysis-theory and applications[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2011

[11] 周蒂,张光前,王仁铎,等. 成分数据的统计分析[M]. 北京:中国地质大学出版社, 1990
Zhou Di, Zhang Guangqian, Wang Renduo, et al. The statistical analysis of compositional data[M]. Beijing: Press of China University of Geosciences, 1990(in Chinese)


(编　辑:文丽芳)