

# 岩土工程勘测 EH-4 观测信号的频谱分析

## The frequency spectral analysis of EH-4 signals in exploration of geotechnical engineering

沙成满<sup>1</sup>, 王恩德<sup>1</sup>, 杨冬梅<sup>2</sup>

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110004; 2. 东北大学 理学院, 辽宁 沈阳 110004)

**摘要:** EH-4 连续电导率成像系统是新一代数字化的电磁法仪器。针对 EH-4 系统有限时长的离散傅立叶变换引起的谱泄露问题, 研究了 EH-4 信号在傅立叶变换中不同尺度窗口下的频谱特点, 不同尺度窗口对 EH-4 信号分析的作用和影响。研究表明, 不同尺度窗口表现了信号的不同方面的特点, 各自具有一定的优缺点, 应根据信号和勘测目的, 在不同尺度窗口下观察波形才有利于更全面、准确地解读信号。

**关键词:** 岩土工程勘测; EH-4 系统; 信号处理; 频谱分析

**中图分类号:** TU 451      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000 - 4548(2005)02 - 0193 - 05

**作者简介:** 沙成满(1964 - ), 男, 黑龙江哈尔滨人, 东北大学博士后, 副教授, 主要从事岩土工程、结构控制与检测方面的教学与科研工作。

SHA Cheng-man<sup>1</sup>, WANG En-de<sup>1</sup>, YANG Dong-mei<sup>2</sup>

(1. School of Resource & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. School of Science, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

**Abstract:** Continuous conductivity imaging system of EH-4 is the update numeral instrument with electromagnetic method. With regard to the spectral leak problem of EH-4 system caused by Fourier transform of limited time and discrete sampling, the frequency spectrum characteristics of EH-4 signals in Fourier transform under the different windows and their influence on signal analysis are discussed. Different windows indicate the characteristics of the different sides of signal, and have the different merits and defects respectively. Analysis and interpretation of EH-4 signals done in different windows will be complete and authentic.

**Key words:** exploration of geotechnical engineering; EH-4 system; signal processing; frequency spectral analysis

## 0 引 言

EH-4 连续电导率成像系统(以下简称 EH-4)是新一代数字化的电磁法仪器, 以其方便快捷、操作简单、较高精度的特点, 集有源电探和无源电探的优点于一身, 代表了目前国际上最为先进的一种电磁法勘探手段。在地下水调查、工程地质勘察、环境灾变和矿产资源勘察等方面发挥了重要作用<sup>[1]</sup>。但在观测信号的处理及物理解释方面至今仍然存在一些问题, 影响了其作用的发挥。首先, EH-4 观测到的是时域上的数字信号, 要经过傅立叶变换使其变换成频率域上的信号。理想傅立叶变换是无限时间上的变换, 然而实际观测信号时, 为最大限度的减小外界干扰的影响, 改进数据质量, 则要求尽可能缩短测量时间, 使得有限时长的傅立叶变换不可避免地产生信号频谱泄露, 从而使频域信号部分失真, 丢失有用的信息, 影响信号质量及其解译效果, 特别对于信号的低频部分所产生的影响就更加显著。一般的处理方法是在傅立叶变换时对时域信号乘以一个窗口函数, 称为“加窗”, 以降低这种频谱泄露的发生。但是, 各种窗口函数有其不

同的特点和作用, 并产生相应的副作用, 使信号产生畸变, 如“平顶”窗虽然“旁瓣”极低, 不易产生泄露, 但会使主瓣加宽。目前, 一般的做法是选用一种窗口函数, 由厂家出厂前写进程序, 实际勘测和解译人员很少变动, 关于不同的窗口函数对于解译效果的影响研究甚少。本文将考虑不同的窗口函数对于岩土工程勘测 EH-4 观测信号傅氏变换后频域信号畸变的影响, 分析不同尺度窗口函数的特点及其作用, 以用于指导生产勘测实践。

## 1 傅立叶变换及窗口函数

对于大多数电磁法观测信号的解释是在频率域上进行的, 而实测信号是在时间域上测得的, 因此时域信号必须经过如下傅立叶变换转换成频率域信号:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt, \quad (1)$$

式中  $x(t)$  为观测到的时域信号,  $X(\omega)$  为变换后的

频域信号。

然而,在信号的实际处理过程中,难以实现上述的理想变换,因为所观测到的信号不可能是无限时间,都具有一定时间长度  $T$ ,另一方面,所观测到的信号是有一定采样时间间隔的数字信号,而不是如上的连续模拟信号,因此计算中上式没有实际意义,而是采用近似的离散有限时长的傅立叶变换。连续时域信号  $x(t)$  离散化的信号  $x(k)$  的离散傅立叶变换定义为:

$$X(\omega) = \sum_{k=0}^n e^{j\omega k} x(k) \quad (2)$$

式中  $x(k)$  是信号  $x(t)$  在时域  $T$  上观测到的一组离散信号,其中  $k=0,1,2,\dots,n$ ,观测时间步长  $\Delta t=T/n$ ,  $X(\omega)$  为连续变换中对应的离散形式。由于  $X(\omega)$  是复数形式,这里的  $X(\omega)$  指的是幅值  $|x(\omega)|$ 。

由于实际的有限时间长度与理想的傅立叶变换存在误差,必然造成频谱泄露,使得变换到频率域的信号在某个频率点上受到邻域的污染,使信号失真,轻者影响解译效果,重者使得信号失去解译价值。为解决频谱泄露问题,通常的做法是在傅立叶变换时乘以一个窗口函数,称为“加窗”,以降低这种频谱泄露的发生。与式(2)相对应,“加窗”的离散傅立叶变换定义为:

$$X(\omega) = \sum_{k=0}^n e^{j\omega k} x(k) \omega(k) \quad (3)$$

式中  $\omega(k)$  为与连续窗口函数  $\omega(t)(t \in [0, T])$  相对应的离散形式。

窗口函数有很多种,各种不同的窗口函数有各自不同的特点,本文只选择4种窗口函数研究,分述如下。

#### (1) 矩形窗函数

其时域解析式为:

$$\omega(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq T, \\ 0 & t < 0, t \geq T. \end{cases} \quad (4)$$

矩形窗函数的特点为采样时域内的常数1,等于没有加窗,反映了原函数自身的特点,矩形窗的谱线主瓣窄,主频精度高,但旁瓣高,产生严重的频谱泄露。

(2) 巴特利特(Bartlett)窗函数(以下简称“巴特窗”):

其时域解析式为:

$$\omega(t) = \begin{cases} \frac{2(t-1)}{T-1} & 0 \leq t \leq \frac{T+1}{2}, \\ 2 - \frac{2(t-1)}{T-1} & \frac{T+1}{2} \leq t \leq T. \end{cases} \quad (5)$$

较以上的矩形窗相比,“主瓣”变宽,主频精度降低,但“旁瓣”降低,频谱泄露有所改善。

(3) 汉宁(Hanning)窗:

其时域解析式为:

$$\omega(t) = 1 - \cos \frac{2\pi}{T} t \quad 0 \leq t \leq T \quad (6)$$

主瓣进一步变宽,主频精度继续降低,但旁瓣随着降低,频谱泄露进一步改善。

(4) 凯塞-贝塞尔(Kaiser-Bessel)窗:

其时域解析式为:

$$\omega(t) = 1 - 1.93 \cos \frac{2\pi}{T} t + 1.92 \cos \frac{4\pi}{T} t - 0.388 \cos \frac{6\pi}{T} t + 0.0322 \cos \frac{8\pi}{T} t, \quad 0 \leq t \leq T \quad (7)$$

主瓣变得最宽,主频最低,但旁瓣随着继续降低,频谱泄露降至很低的水平。可以看出,有限时间内的信号傅立叶变换的频谱泄露现象不可避免,窗口函数的作用在于尽可能的降低这种泄露,但是这种降低是以牺牲信号的主瓣频率精度为代价的,选用哪种窗口函数,则根据信号的解译目的,下面将就各种窗口函数对傅立叶变换的影响做定量仿真研究。

## 2 窗口函数对谐波函数傅立叶变换的影响

为了最大限度地降低信号傅立叶变换中的频谱泄露,尽可能减少信号畸变,提高解译质量,我们针对EH-4信号频域内低频部分(1~1000 Hz)的谐波信号在傅立叶变换中的情况进行了研究。任何时域信号都可以看成不同频率的谐波信号的线性组合,单位谐波对于理想的无限时长的傅立叶变换在频域内是单位脉冲,因此研究不同频率的不同窗口函数的谐波  $e^{i\omega t}$  在取样时长  $T$  内的离散傅立叶变换,便于与理想脉冲相比较。我们研究了频率从低到高的谐波函数在上述4种窗口函数作用下的频谱泄露情况,限于篇幅,从中选取有代表性的4个频率点(1, 5, 10, 1000 Hz),给出该频率点单位谐波在4种窗口函数下的频谱图(图1~4)。研究表明,影响频谱泄露的因素有取样时域长度  $T$ , 数字取样间隔,谐波频率以及窗口函数。傅立叶变换要求取样时域长度(积分时长)越长频谱泄露越少,但为了防止外界电磁信号的干扰,系统又要求取样时域长度尽可能短,这是一对矛盾,并且受软硬件条件限制,综合考虑EH-4系统确定低频部分取样时间长度380 ms,采样间距约为83.33 ns,等间隔数字采样4560点,以下主要讨论频率和窗口函数的影响。

频率是影响频谱泄露的最重要的因素之一,随着频率的增加,频谱泄露的程度在降低,也就是说傅立叶变换中信号畸变少,精度高,这也是代表浅部的高

频信号勘测精度高的原因之一。图 1~4 为不同窗口函数不同频率单位谐波傅立叶变换的频谱图, 反映了频谱泄露的情况, 随着频率的增加, “旁瓣” 幅值快速下降, 在低频部分 (1~10 Hz) 降速很快, 但随着频率的增加降速降低并趋于稳定, 因此实际上低于 10 Hz 的信号杂质不稳定而不宜使用, 从主瓣的宽度看, 矩形窗 5.2 Hz, 巴特窗 10 Hz, 汉宁窗 10.5 Hz, 凯塞窗 16.5 Hz, 受主频影响不大。对于低频信号, 这个数字可能太大, 超过信号本身至少几倍, 但相对于高频信号主频而言, 可能并不是很大, 从泄露波及的频率宽度看, 随着频率的增加而降低。

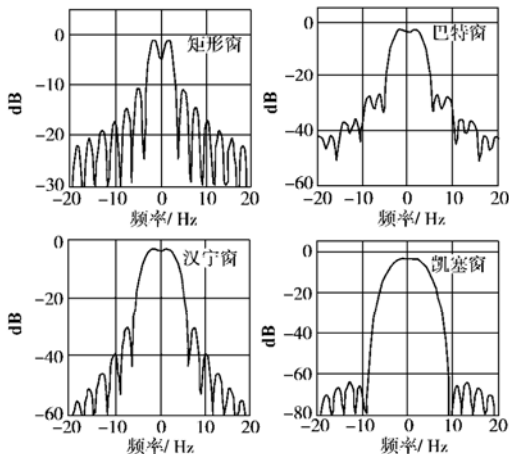


图 1 频率  $f=1\text{ Hz}$  单位谐波不同窗口下频谱图

Fig. 1 Frequency spectral map of the unit simple harmonic wave in 4 different windows when  $f=1\text{ Hz}$

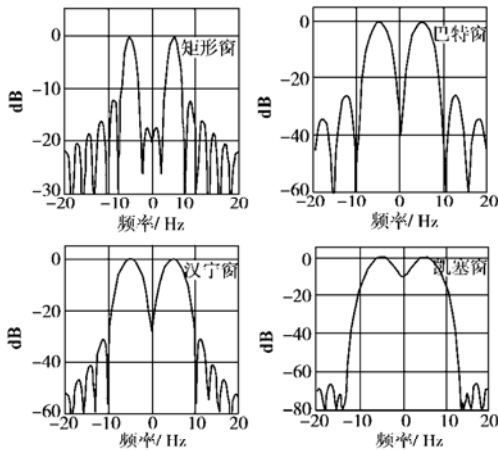


图 2 频率  $f=5\text{ Hz}$  单位谐波不同窗口下频谱图

Fig. 2 Frequency spectral map of the unit simple harmonic wave in 4 different windows when  $f=5\text{ Hz}$

无论在哪一个频率点上, “窗口” 函数都使频谱泄露大大改善。如图 1~4, 图中可以看出, 矩形窗 (相当于无窗) 的谱泄露最为严重, 在低频部分, 其第一 “旁瓣” 接近 -11 分贝, 接近主瓣的 30%, 并且波及的频率范围广, 使得邻域产生严重污染, 如果谱成分复杂, 与邻域其它的谱成分叠加在一起, 很难区分,

将使信号产生严重畸变; 巴特窗使得旁瓣大幅度降低, 在低频部分时, 其第一 “旁瓣” 降至 -27 分贝, 比矩形窗下降 15 分贝, 大大改善了泄露的幅度, 但负面影响是主瓣的影响频率范围加宽, 比矩形窗增加一倍, 降低了信号的频率识别精度; 汉宁窗的效果较巴特窗又有改善, 低频部分第一 “旁瓣” 继续下降 5 分贝, 再向两侧则下降 10 分贝以上, 而主瓣频率宽度没有增加, 这也是汉宁窗被广泛采用的原因之一, 但汉宁窗主瓣头部图形比巴特窗更圆, 也就是主瓣随着频率远离主频, 谱值下降慢, 主峰值不明显, 不易准确定位主频; 凯塞窗在低频部分将旁瓣的幅值降直 -62 分贝, 高频时近 -70 分贝, 这个精度已相当理想, 基本能保证正常信号不受影响, 但其信号主瓣进一步加宽, 近 20 Hz, 主瓣 20 分贝以上部分 14 Hz, 不容易准确定位主频。

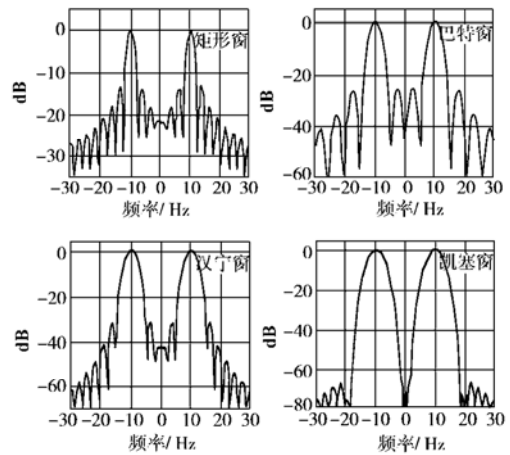


图 3 频率  $f=10\text{ Hz}$  单位谐波不同窗口下频谱图

Fig. 3 Frequency spectral map of the unit simple harmonic wave in 4 different windows when  $f=10\text{ Hz}$

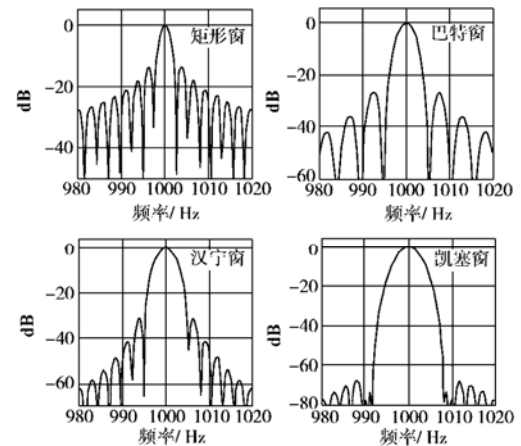


图 4 频率  $f=1000\text{ Hz}$  单位谐波不同窗口下频谱图

Fig. 4 Frequency spectral map of the unit simple harmonic wave in 4 different windows when  $f=1000\text{ Hz}$

由上述可知, 从矩形窗, 巴特窗, 汉宁窗到凯塞

窗,旁瓣的幅值逐次降低,向邻域的谱泄露逐渐改善,但主瓣谱宽度逐渐增加。因此在信号分析与解译时对傅立叶变换如何选用窗口函数成为一个主要问题。我们通过一个不同频率谐波组合成的信号在不同窗口下的频谱图说明不同窗口的作用,图5是该信号理想的无限时长积分的傅立叶变换(式(1))的频谱图,当然它不存在频谱泄露,用该频谱图与文中所使用的有限时长 $T$ 的离散傅立叶变换(式(3))所得到的频谱图(图6)进行对比研究。图6中可以看出,不同窗口函数的谱线是不同的,矩形窗基本保持了原信号随频率变化的波形,但是由于谱泄露的影响,对信号两侧污染严重,信号严重畸变,如50 Hz幅值0.2的信号淹没在杂质谱线中,分不清哪个是杂质,哪个是信号,不利于解译中异常提取,造成误判。加窗后,从矩形窗—巴特窗—汉宁窗—凯塞窗,信号的观察频率加宽,检出的信号异常愈加清晰,由谱泄露引起的杂质信号逐渐变小,但由于对频率定位的分辨率降低,使波形发生改变。也就是说,每个窗口都有自己的观察波形的尺度,矩形窗是小尺度窗口,相当于窄频率抵近观察,虽然能辩清波形细部,但使信号产生畸变,据此得到的波形趋势和异常不准确,凯塞窗是大尺度窗口,相当于从宽频远处观察,虽然看不清波形细部,但对波形的异常和趋势展现得非常清楚,由谱泄露引起的主瓣以远的杂质波几乎不见,巴特窗和汉宁窗属于中尺度过渡情况。研究某一频率点的信号,不能在矩形窗下确认,以免将杂质误认为信号。不同窗口函数的作用是不同的,不可互相替代。任何一个窗口下都不可能得出信号的理想谱线,而只是反映理想谱线的某一侧面,应在不同窗口下观察,才能够更全面、准确地解读信号。窗口函数不止以上4种,如何选用窗口函数,应根据实地的地质条件和勘测目的,对勘测目标的异常应有初步的判断。对于普查性质寻找大的含水层,圈定大的宏观地质体界限,应选用大尺度窗口,对于详查或指导工程勘探的勘测工作,对每一个波形进行详细研究解译,应在不同尺度窗口下详细观察波形。

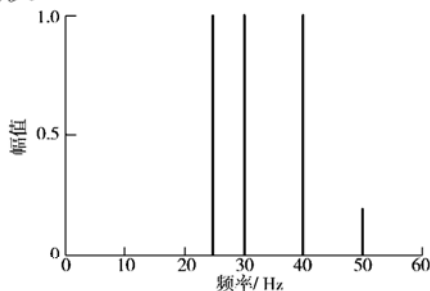


图5 一组谐波信号的理想频谱图

Fig. 5 Perfect frequency spectral map of a group of simple harmonic wave

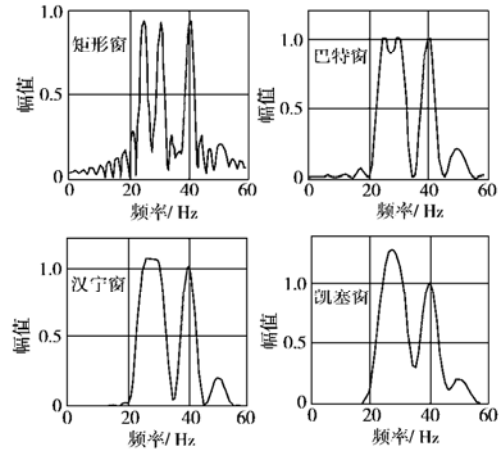


图6 一组谐波信号的不同窗口下离散傅立叶变换频谱图

Fig. 6 Frequency spectral map of a group of simple harmonics wave in discrete-time Fourier transform under different windows

不能脱离具体的信号和勘测目的而谈那一个窗口好或不好,那种只是简单地在一个窗口中解读信号的做法是不全面的,也是不科学的。

### 3 算 例

我们选用了EH-4系统实测并计算的辽宁某地的一个测点的一组数据,限于篇幅,只选用其中低频部分的一个频率段(10~120 Hz);由于计算技术的发展,各种软件平台和信号处理算法趋于成熟<sup>[2-5]</sup>,对于计算的精度能够满足要求,我们的算法参考了文献<sup>[3-6]</sup>,在Metlab系统上进行计算。

图7是测得时域上的数据经过不同窗口傅立叶变换后得到的相对视电阻率 $\rho_x/\rho_{xA}$ ( $\rho_x$ 为 $X$ 坐标视电阻率, $\rho_{xA}$ 为 $\rho_x$ 的峰值)随频率变化曲线。

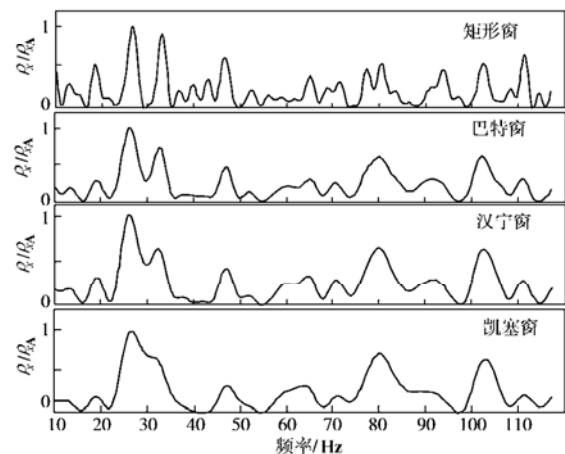


图7 辽宁某地一测点EH-4实测并计算的不同窗口下视电阻率曲线

Fig. 7 Curves of resistivity under different window surveyed in EH-4 on the site in Liaoning

图7中可以看到,矩形窗内的波形丰富,便于研

究波形细部信息, 但其中含有大量泄露的谱成分, 杂质含量多, 需要参考其它窗口的波形才能认清信号和杂质, 如在  $f=40\text{ Hz}$  左右的频率点矩形窗内连续 3 个波峰, 在其它窗口中不见了, 说明是杂质而不是信号, 在  $f=80\text{ Hz}$  的频率点各个窗口都表现为波峰, 说明信号的存在, 但在矩形窗中为双峰, 在其它窗口中是看不到的。在  $f=110\text{ Hz}$  的频率点上, 矩形窗中是很大的波峰, 而其他窗口中是一个小波峰, 说明矩形窗中的这个峰值含有杂质, 在  $f=30\text{ Hz}$  左右的频率带, 是峰值区, 不同窗口的波形有不同的形态。因此, 不同窗口各有特点, 波形需要从不同窗口中观察和研究, 才能对信号有全面的认识。

### 4 结 论

通过单位谐波信号、谐波组合信号以及实测信号, 研究了 EH-4 系统信号的傅立叶变换中不同窗口下的频谱特点。由于有限时长的离散傅立叶变换引起谱泄露, 引起信号变形, 因此对信号加窗以改善谱泄露, 但同样会丢失窄频内波形细部信息。对信号进行解译时应在不同尺度窗口下观察才能够更全面、准确地解译信号, 而只在一种窗口下解译信号的做法是不全面的, 也是不科学的。

### 参考文献:

[1] 孙升林, 倪新辉, 等. EH-4 电磁成像系统在中西部岩溶区地下水勘察中的应用[J]. 中国煤田地质, 2001,13(3): 67 - 68.

[2] Biswa Nath Datta. Preface for the special issue on numerical linear algebra techniques for control and signal processing[J]. Numerical Linear Algebra with Applications, 2001, 8 (3 - 4):355 - 356.

[3] Fernand S Cohen, Athina Petropulu, Georgia Georgiou, Walid Ibrahim. Multimedia digital signal processing laboratory[J]. Computer Applications in Engineering Education, 2000,8(3 - 4),209 - 215.

[4] Gordana Jovanovic-Dolecek, Juan Manuel Madrigal, Ibarra Manzano Oscar. MuDSPDEMO-Demo package for multirate digital signal processing[J]. Computer Applications in Engineering Education, 2000, 8(2): 132 - 138.

[5] John Glossner, Jesse Thilo, Stamatis Vassiliadi. Java signal processing: FFTs with bytecodes,Concurrency[J]. Practice and Experience, 1998,10(11 - 13):1173 - 1178.

[6] 楼顺天, 李博菡. 基于 MATLAB 的系统分析与设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.

(上接 172 页)

代码	期刊	主编	分类	代码	期刊	主编	分类
E350	矿物学报	涂光炽	矿业类	X013	中国公路学报	王秉纲	交通运输类
C001	力学学报	王自强	力学类	N059	中国机械工程	蔡玉麟	机械类
H280	林业科学	沈国航	林业类	A105	中国科学 A	杨乐	数学类
K017	煤炭学报	胡省三	矿业类	A106	中国科学 B	徐光宪	化学类
N084	摩擦学报	薛群基	机械类	A108	中国科学 D	孙枢	地质科学类
A025	南京大学学报	龚昌德	综合类	H290	中国水产科学	吴万夫	水产类
H021	南京农业大学学报	郑小波	农业大学学报	T022	中国塑料	杨惠娣	化工类
G116	中国危重病急救医学	王今达	基础医学、综合类	G147	中华结核和呼吸杂志	钟南山	预防医学、卫生学类
M022	中国稀土学报	徐光宪	材料科学技术类	G148	中华口腔医学杂志	傅民魁	口腔医学类
G001	中国药理学报	丁光生	药学类	G156	中华内科杂志	王海燕	内科医学类
M028	中国有色金属学报	何继善	冶金、金属类	G197	中华神经科杂志	陈清棠	神经精神医类
G182	中国中西医结合杂志	陈可冀	中医中药类	G164	中华外科杂志	黄延庭	外科医学类
G135	中华病理学杂志	吴秉铨	基础医学、综合类	G173	中华眼科杂志	赵家良	眼耳鼻喉科医学类
G138	中华儿科杂志	吴希如	妇、儿科医学类	G176	中华医学杂志	巴德年	基础医学、综合类
G139	中华耳鼻喉科杂志	杨伟炎	眼耳鼻喉科医学类	G179	中华肿瘤杂志	张友会	肿瘤医学类
G140	中华放射学杂志	戴建平	特种医学类	S026	自动化学报	何善育	电子通讯类
G143	中华骨科杂志	邱贵兴	外科医学类	A082	自然科学进展	师昌绪	综合类
G146	中华护理杂志	顾美仪	护理医学类	Z012	自然资源学报	李文华	环境类
G174	中华检验医学杂志	丛玉隆	临床医学类	H034	作物学报	辛志勇	农业类