

利用雷达散射截面面积序列的特定航天器 工作平台分类识别方法

牛威¹, 苏威², 郝培杰², 李少敏²

(1. 中国西安卫星测控中心宇航动力学国家重点实验室, 710043, 西安; 2. 中国西安卫星测控中心, 710043, 西安)

摘要: 针对三维运动特性及雷达散射截面面积(RCS)的姿态敏感性等因素影响航天器在轨运行识别的问题,结合特定工作平台 RCS 测量序列的典型特征,提出将每个观测弧段的 RCS 序列视为图像来提取边缘、骨架和密度等特征,再利用基于 Hausdorff 距离的图像匹配方法与特定工作平台上的航天器模板进行匹配识别,从而有针对性地实现了航天器的分类识别. 实测结果表明,所提方法的分类正确率可高达 85%,识别效果明显优于传统的统计和小波变换的方法.

关键词: 图像匹配;航天器模板;匹配识别

中图分类号: TN95 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)12-0053-06

An Identification Method for Specific Spacecraft Platform Using Radar Cross Section Sequence

NIU Wei¹, SU Wei², HAO Peijie², LI Shaomin²

(1. State Key Laboratory of Astronautic Dynamics, China Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710043, China;

2. China Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710043, China)

Abstract: A method for identifying specific spacecraft is proposed to improve the problem that statistic characteristics or various translation characteristics of RCS (radar cross section) sequence are inconsistent and can not be used to correctly identify spacecrafts which is caused by the influence of the three-dimensional movement characteristic of the spacecraft and the attitude sensitivity of RCS. The proposed method bases upon analyses on the RCS sequence, and identifies specific platforms using narrow-band radar RCS sequence. The method extracts edge, skeleton, density and other characteristics of arcs by regarding the RCS sequence of each arc as an image, and uses an image matching method based on Hausdorff distance to classify and identify spacecrafts, so that spacecrafts can be effectively identified on specific platforms. Test results show that the proposed method achieves a 85% accurate rate for the specific spacecraft platform identification, and is much better than traditional statistics and wavelet decomposition methods.

Keywords: image matching; spacecraft platform; matching recognition

目标的雷达散射截面面积(RCS)包含了丰富的信息,是窄带雷达获取目标雷达特性的主要数据,因此利用 RCS(用 ξ 表示)测量数据的目标分类识别是空间目标识别的一个重要方面^[1]. 不同观测弧段的雷达对航天器观测的角度有所不同,而 RCS 对姿态角

的变化比较敏感,这样每个航天器在不同观测弧段获得的 RCS 序列统计特征及其变换特征则有所不同^[2],利用这种特征来识别空间目标其效果是不理想的.

受卫星特征部件(如航天器上的抛物面天线)或

卫星工作方式(如气象卫星)的影响,某些特殊工作平台上的航天器在不同弧段的 RCS 序列具有相似的特征,但与其他工作平台上的航天器在 RCS 上却明显不同.图 1 列举了具有典型特征、在 4 类不同工作平台上的航天器 RCS 序列.

利用 RCS 序列的统计特征及其变换特征对 4 类目标进行分类识别的误判率较高.通过分析得出,将每个观测弧段的 RCS 序列视为图像,即将 RCS 的记录时间作为横轴、RCS 的幅值作为纵轴来绘制二维图形,再利用图像匹配的方法进行识别,能够达到较好的分类识别效果.直接利用 RCS 序列图像进行匹配,虽然可以充分利用图像的所有信息来区分不同的对象,但要处理的信息量也很大,计算复杂度也很高,抗噪声和抗干扰的能力比较差,而利用图像的边缘、骨架、密度等特征进行识别,可以降低运算量,增强适应能力.

本文利用 Hausdorff 距离进行了匹配处理. Hausdorff 距离是一种极大、极小距离,适用于计算 2 个点集之间的匹配程度^[2-3].基于 Hausdorff 距离的图形匹配不必建立 2 个点集中点的一一对应关系,因此它对图像噪声具有较好的鲁棒性,但是当所匹配的点数比较多时,该方法的匹配效率会迅速降低.针对这一问题,本文提出了具体的解决办法.

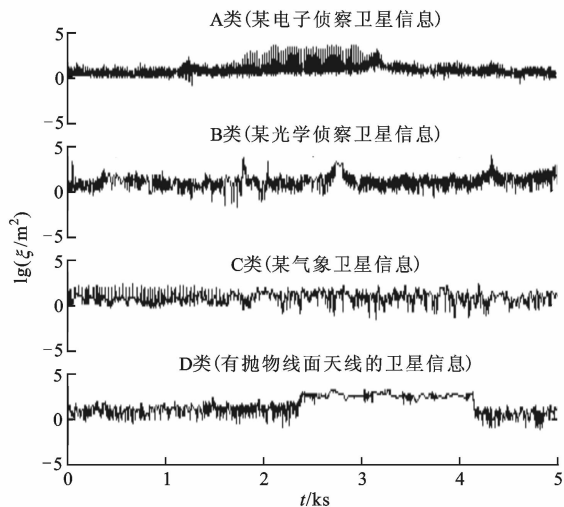


图 1 4 类工作平台上的卫星 RCS 序列图

1 航天器平台分类识别中的问题

1.1 Hausdorff 距离

给定 2 个有限点集 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_p\}$ 和 $B = \{b_1, b_2, \dots, b_q\}$, A 和 B 之间的 Hausdorff 距离为

$$H(A, B) = \max\{h(A, B), h(B, A)\} \quad (1)$$

$$h(A, B) = \max_{a \in A} \min_{b \in B} \|a - b\| \quad (2)$$

式中: $\|\cdot\|$ 是某种意义上的范数(如欧氏距离); $h(A, B) = d$ 表示集合 B 中至少存在着一个点,其与 A 中的点的距离小于或等于 d .

由式(1)和式(2)有

$$H(A, B) = \max(h(A, B), h(B, A)) = \max(\max_{a \in A} \min_{b \in B} \|a - b\|, \max_{b \in B} \min_{a \in A} \|a - b\|)$$

如果定义

$$d_B(x) = \min_{b \in B} \|x - b\|; d'_A(x) = \min_{a \in A} \|a - x\|$$

则有

$$H(A, B) = \max(\max_{a \in A} d_B(a), \max_{b \in B} d'_A(b)) \quad (3)$$

固定集合 A , 移动集合 B , 则平移情况下的最小 Hausdorff 距离为

$$M_T(A, B) = \min_t H(A, B \oplus t) \quad (4)$$

式中: $\oplus$ 表示 Minkowski 和符号; $B \oplus t = \{b + t | b \in B\}$.

与大多数二值匹配有所不同的是,基于 Hausdorff 距离的匹配无须知道点与点之间的一一对应关系^[4],比如 A 中有一个以上的点可以与 B 中的同一点相对应.因此,采用 Hausdorff 距离可以对具有不完全相同点的 2 个点集之间的相似性进行度量,从而完成点间的配准.

1.2 Hausdorff 距离在 RCS 序列图形匹配中的问题

用 Hausdorff 距离进行 RCS 序列图像的匹配主要存在两个方面的问题,一是运算量对匹配速度的影响,二是噪声和干扰对 Hausdorff 距离计算的影响.

由于原 RCS 序列图像中的 RCS 像素点数较庞大,因此原图不宜直接参与匹配,只能通过提取有效的图形特征进行匹配.传统的图形特征包括角点^[5]和轮廓边缘^[6]等,但这些特征不适用于 RCS 序列图像. RCS 序列图像为点集图,角点太多,规律性也不明显,由 RCS 序列图像轮廓特征提供的信息并不全面.

图形的骨架特征能够反映目标形状的几何结构,且不易受到噪声和形状细节变化的影响,还可保持目标不发生断裂,保持欧拉数不变.相对于原图像,骨架特征的数据量比较少,但参与匹配运算的像素却比较大.

2 RCS 序列图像匹配的分类识别方法

本文的设计思路是,利用 Hausdorff 距离的优

势来进行空间目标 RCS 序列图像匹配,以达到自动目标识别的目的,并在实现过程中克服图像匹配运算量过大的缺点. 具体的识别过程是:①根据待匹配图像的紧凑程度进行目标的初次分类;②提取图像的轮廓特征,根据轮廓信息找出模版图像与待匹配图像的最佳匹配的大致位置;③在最佳匹配位置附近的一个较小的范围内,计算骨架特征的Hausdorff 距离,并通过图像的细匹配进行目标识别;④对匹配区域像素分布的紧凑程度进行分析,以验证识别的正确性.

2.1 基于像素分布紧凑度的初分类

紧凑度反映的是目标对其外接矩形的充满程度,定义为目标的像素与包围目标的最小外接矩形内的像素的比值,即

$$J = P/P_{\text{MER}} \tag{5}$$

对于二值图像,目标的像素值即为目标的面积值,目标的最小外接矩形内的像素值就等于最小外接矩形的面积值. P_{MER} 的计算方法是:将目标的边界以 3° 或 5° 的增量在 90° 范围内旋转,旋转一次便记录一次目标在坐标 x 、 y 方向上的外接矩形边界点像素的最大和最小值,当旋转到某个角度 α 时,外接矩形的面积达到最小,即为目标最小外接矩形的面积,亦即 P_{MER} .

以图 1 所示的 4 类航天器为例,通过计算得到的紧凑度如表 1 所示.

表 1 4 类航天器 RCS 序列紧凑度计算结果

弧段	J			
	A 类	B 类	C 类	D 类
1	0.199 3	0.219 7	0.153 5	0.080 3
2	0.209 0	0.228 4	0.154 5	0.113 8
3	0.216 0	0.247 5	0.152 6	0.081 0
4	0.209 7	0.238 4	0.153 6	0.110 8
5	0.211 9	0.244 6	0.146 7	0.110 7

通过计算工作平台上的航天器 RCS 序列的紧凑度发现,D 类航天器有别于其他航天器,根据设定的门限($J<0.13$)可将它首先识别出来.

2.2 基于轮廓特征的匹配区域粗定位

虽然图像的轮廓特征不能完整地描述 RCS 序列的特性,但通过对轮廓特征 Hausdorff 距离的计算可以找到图像匹配的大致位置,而且所需的计算量要比骨架小得多.

为了提取出 RCS 序列的图像轮廓信息,需要利用邻域平均法的均值滤波器对 RCS 序列图像进行滤波. 邻域平均法属于空间域平滑噪声技术. 对于给

定图像 $f(i,j)$ 中的每一个像素点 (m,n) ,取其邻域 S ,并假设 S 中含有 M 个像素,则 M 个像素的平均值可作为处理后图像的像素点 (m,n) 的灰度. 用一个像素邻域内像素点灰度的平均值来代替该像素点原来的灰度,即为邻域平均技术. 假设噪声 n 是加性噪声,在空间各点互不相关,且其期望值为 0、方差为 σ^2 ,含噪声的图像 $f(i,j)$ 经过邻域平均法处理后为

$$\bar{f}(m,n) = \frac{1}{M} \sum f(i,j) = \frac{1}{M} \sum g(i,j) + \frac{1}{M} \sum n(i,j) \sigma_a^2 = \frac{1}{M} \sigma^2 \tag{6}$$

式中: g 为未受污染的图像. 滤波后噪声的大小为原来的 $1/M$,图像的有用信息通过累加平均有效地保留了下来. 滤波邻域大小需要根据具体空间目标的特点来确定,特别是对于分布比较稀疏的点集,必须保证在区域内具有足够多的有效 RCS 像素点参与计算,而在孤立点噪声周围有效的 RCS 像素点尽可能少. 这样,在滤波时只要设置适当的门限,就可以通过图像的分割提取出稀疏点集的轮廓,减小孤立点噪声的影响. 为了进一步减小计算量,可以先填充轮廓图像中的孔洞,再进行外轮廓提取. 匹配运算是基于点集的,而轮廓特征中连续的点集含有大量的冗余信息,因此在不影响匹配结果的情况下可以采取等间隔抽取,最后利用有代表性的特征点进行匹配.

图 2 所示为 A 类航天器 RCS 序列模板图像的轮廓特征示意图.

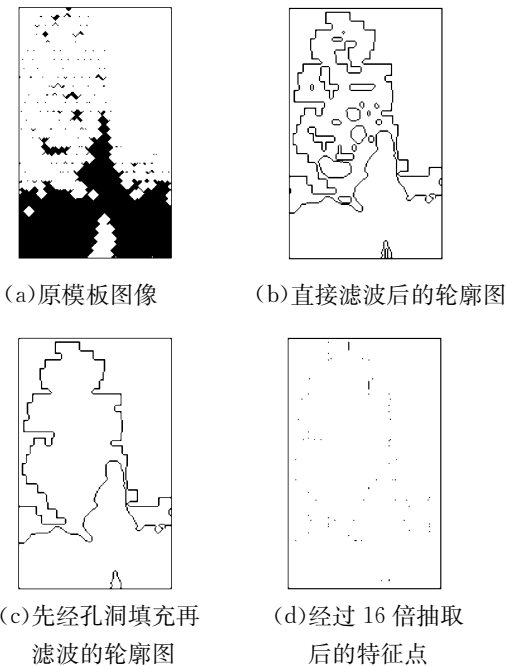


图 2 A 类航天器 RCS 序列模板图像的轮廓特征提取图

以 3 类航天器为例,通过计算得到的轮廓匹配结果如表 2 所示.

表 2 3 类航天器的轮廓匹配结果

弧段	Hausdorff 距离/像素		
	A 类	B 类	C 类
1	17.204 7	20	36.00
2	15.000 0	25	27.00
3	22.627 4	34	33.00
4	16.031 2	31	32.24

2.3 图像骨架特征的细匹配

2.3.1 RCS 序列的图像骨架特征提取 骨架提取算法始于 Blum 的模拟“烧草(grassfire)”变换,而目前广泛采用数学形态学方法.数学形态学^[7]的基本思想是,用具有一定形态的结构元素去度量和提取图像的形状,以达到分析和识别图像的目的,其基本运算是腐蚀和膨胀.

形态学骨化算法以上述运算为基础,并在给定系列的具有一定形状的结构元素后,序贯地删除满足击中变换的像素.具体算法如下.

设 $S(A)$ 代表 A 的骨架,依数学形态学定义的骨架为

$$S(A) = \bigcup_{k=0}^K (A \ominus k B) - [(A \ominus k B) \circ B] \quad (7)$$

式中:“ $-$ ”表示集合减操作,即求集差; B 表示结构元素; $\ominus$ 表示腐蚀运算;“ $\circ$ ”表示开运算; $(A \ominus k B)$ 表示用 B 对 A 进行 k 次腐蚀, $(A \ominus k B) = ((\cdots(A \ominus B) \ominus B) \ominus \cdots) \ominus B$; k 表示将 A 腐蚀为空集前最后一次迭代的次数, $k = \max\{k | (A \ominus k B) \neq \varnothing\}$.

形态学骨化算法能将大量复杂的图像处理成最基本的移位和逻辑运算,能正确地反映目标的几何结构,却不受噪声和形状细节变化的影响,能保持目标不发生断裂,保持欧拉数不变.因此,用图像的骨架特征进行图像匹配,不仅极大地减少了运算量,而且具有抵抗噪声和干扰的能力.航天器在一个弧段上的 RCS 序列图如图 3 所示,其骨架特征如图 4 所示.

从图 4 可以看出,在 RCS 序列的骨架特征图中,有效像素大大减少了,但原图的几何结构特征却保存了下来.

2.3.2 骨架特征的匹配结果 通过对轮廓特征匹配区域的粗定位,可以找到图像最佳匹配的大致位置,再在小范围内的待匹配图像的骨架图上移动模板的骨架特征图,并运用 Hausdorff 距离实施求解,便可进行图像的细匹配. A 类航天器模板图像的骨

架图如图 5 所示,运用该模板对 3 类航天器进行细匹配后的所得结果如表 3 所示.

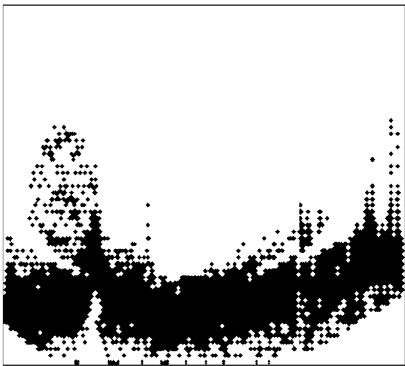


图 3 航天器在一个弧段上的 RCS 序列

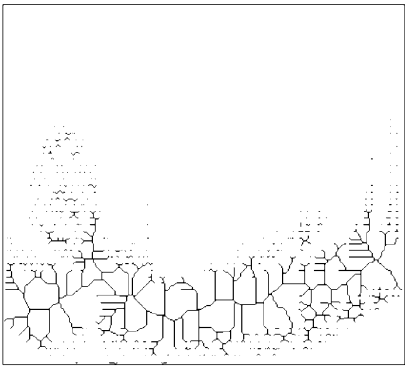


图 4 图 3 RCS 序列的骨架特征

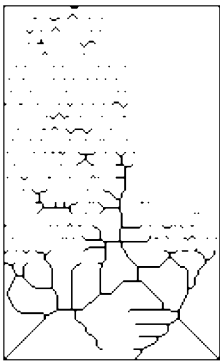


图 5 A 类平台航天器模板图像的骨架图

表 3 3 类航天器 RCS 序列的骨架匹配结果

弧段	Hausdorff 距离/像素		
	A 类	B 类	C 类
1	18.357 6	49.040 8	37.536 6
2	18.336 5	38.327 5	25.632 0
3	16.552 9	57.428 2	28.465 8
4	20.518 3	32.557 6	33.679 1

从表 3 可以看出,模板与 A 类航天器的骨架匹配结果小于 25 像素,而其他 2 类航天器的匹配结果远大于 25 像素,因此 25 像素可以作为匹配域值.

2.4 基于像素分布紧凑度的匹配验证

骨架特征匹配仍存在误判的情况,为了避免误判,本文对匹配区域的像素紧凑程度进行了分析和比较,并对分类识别的正确性加以判断,具体的方法如下.

从待匹配图像中分割出与模板图像最为匹配的区域,再比较分割区域与模板图像之间的像素紧凑度的分布.如果像素紧凑程度的分布情况相同,则认为匹配结果可信,反之认为不可信.像素紧凑度为每一行像素集中非零像素的总数与该行总像素数的比值.

A 类航天器模板图像像素的紧凑度分布如图 6 所示,A 类、B 类、C 类航天器某弧段匹配的紧凑度分布如图 7~图 9 所示.

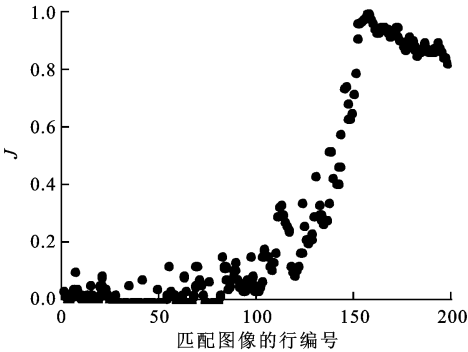


图 6 模板图像像素的紧凑度分布

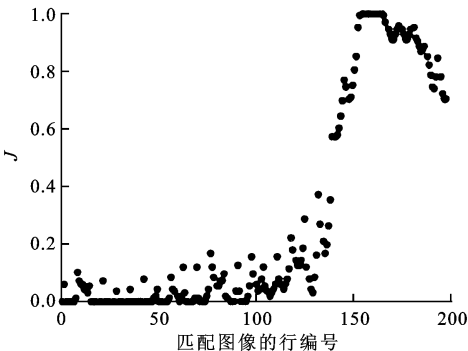


图 7 A 类航天器某弧段匹配的紧凑度分布

由于图 6~图 9 均为点集图,因此可以进行 Hausdorff 距离计算,如果 Hausdorff 距离在域值的范围内,则认为匹配结果可信.

3 类航天器的验证结果如表 4 所示.从表 4 看出,A 类航天器的像素分布同模板的非常接近,其 Hausdorff 距离均在 20 像素以下,而其他 2 类航天

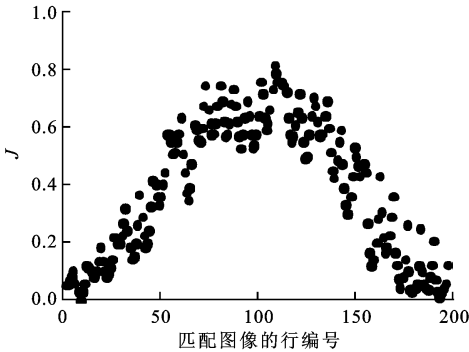


图 8 B 类航天器某弧段匹配的紧凑度分布

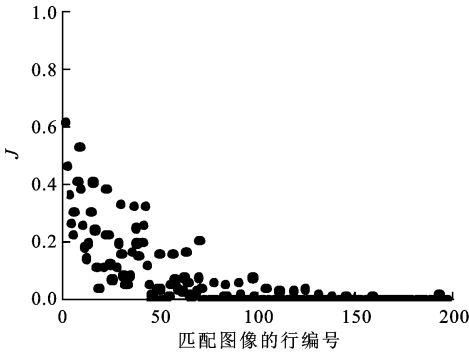


图 9 C 类航天器某弧段匹配的紧凑度分布

表 4 3 类航天器平台的验证结果

弧段	Hausdorff 距离/像素		
	A 类	B 类	C 类
1	5.421 4	56.342 6	74.347 6
2	7.477 3	49.682 0	70.392 0
3	6.031 8	63.629 5	86.212 4
4	10.342 8	40.186 2	63.502 8

器的像素分布同模板相差较大,其 Hausdorff 距离远大于 20 像素,这进一步验证了匹配的效果.

3 识别性能的测试比较

本文用大量的 RCS 序列进行了实测,并用传统的统计方法、小波变换方法及本文方法在完全相同的硬件条件下对 3 类航天器进行了分类识别,结果如表 5 所示.

表 5 3 种方法对 3 类航天器的识别成功率

方法	识别成功率/%		
	A 类	B 类	C 类
统计	21.42	26.34	24.76
小波变换	59.47	62.68	60.39
本文	86.03	88.62	86.21

由表5可见:统计方法的识别率最低;小波变换方法的识别率虽然有所提高,但结果仍然不够理想;本文方法的识别率大于85%,识别效果明显优于传统的统计方法和小波变换方法。

4 结 论

通过对空间目标的监视发现,特殊工作方式的航天器具有独特的RCS序列,利用RCS序列进行统计或者特征变换不能完成目标的分类识别。针对此问题,本文提出将每个观测弧段的RCS序列视为一幅二值图像,从中提取边缘、骨架和紧凑度等特征,再用Hausdorff距离来实现特定工作方式的航天器的分类识别。经大量实测数据的验证表明,本文方法对RCS序列中具有典型特征的航天器的识别正确率大于85%,识别效果明显优于传统的统计方法和小波变换方法。

参考文献:

- [1] DELISLE G Y, SEBBANI Z, CHARRIER C, et al. A novel approach to complex target recognition using RCS wavelet decomposition[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2005, 47(1): 35-55.
- [2] VIVEK E P, SUDHA N. Robust Hausdorff distance measure for face recognition [J]. Pattern Recognition, 2007, 40(2): 431-442.
- [3] BUSTOS J P, DONOSO F, GUESALAGA A, et al.

Matching radar and satellite images for ship trajectory estimation using the Hausdorff distance [J]. IET Radar Sonar Navig, 2007, 1(1): 50-58.

- [4] VIVEK E P, SUDHA N. Gray Hausdorff distance measure for comparing face images [J]. IEEE Transactions on Information forensics and Security [J]. 2006, 1(3): 342-349.
- [5] 胡正平, 杨苏. 基于关键角点引导约束的广义 Hough 变换两层目标定位算法[J]. 燕山大学学报, 2010, 34(3): 207-213.
HU Zhengping, YANG Su. A two-level generalized Hough transform object location algorithm constrained by critical corner points [J]. Journal of Yanshan University, 2010, 34(3): 207-213.
- [6] 赵海勇, 刘志镜, 张浩. 基于轮廓特征的人体行为识别 [J]. 光电子·激光, 2010, 21(10): 1547-1551.
ZHAO Haiyong, LIU Zhijing, ZHANG Hao. Human action recognition using the image contour [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2010, 21(10): 1547-1551.
- [7] 杨效余, 张天序. 一种基于复杂地物背景图像的目标识别方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(1): 13-16.
YANG Xiaoyu, ZHANG Tianxu. Method of target recognition from images based on complex natural scenes [J]. System Engineering and Electronics Technology, 2011, 33(1): 13-16.

(编辑 苗凌 武红江)

《科研论文写作新解》出版

本刊讯 由西安交通大学期刊中心主任赵大良编审编著的《科研论文写作新解》已于2011年9月由西安交通大学出版社出版。《科研论文写作新解》由论文与期刊、编辑与审稿、博弈与发表、写作与准备、格式与规范、版权与不端、评价与传播等部分构成。

该书不同于传统的科研论文写作教程,作者对于如何提高论文写作质量、提高论文命中率有着独到的见解。内容从学术期刊的本质到论文写作的目的,从编辑的稿件处理规程到审稿人的审稿原则,从如何把握退改的机会到如何面对审稿人的无理意见等等,以期刊主编和审稿人的视角剖析论文的写作重点和发表困惑,坦陈期刊出版的运作方式,揭示审稿的基本原则,感悟论文写作的重点,诠释期刊选择的策略,帮助读者提高科研论文写作的层次,使作者尽快达到论文写作的自由之境。

该书作为科研论文写作教材的辅助读物,适合于具有一定写作基础的作者或具有一定投稿经历的作者,特别是对于编辑出版和传播专业的在读研究生,则是一举两得:提高论文写作的能力,感悟学术出版的本质。该书对于期刊编辑加深对学术出版的认识、提高与作者的沟通能力、提高办刊水平,也有很好的参考价值。全国各大书店、网店已经上架销售。