

周边桁架可展开天线展开过程运动分析及控制

李团结, 张 琰, 段宝岩

(西安电子科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 根据周边桁架式可展开空间天线的结构特点, 先建立周边单元浮动坐标系, 采用坐标变换方法, 得出了周边单元间的运动变换关系, 建立了该天线通用的展开过程运动分析模型, 可分析展开过程中结构上任意点的位置、速度和加速度. 为避免展开过程中冲击过大, 对周边单元的展开速度进行规划. 根据驱动绳索的运动与单元展开运动之间的变换关系, 将周边单元的运动规划转化为展开绳索的运动控制, 对天线的展开实施位置控制. 仿真实例表明该控制方法可使天线按照规划的展开角变化规律平稳展开.

关键词: 周边桁架; 可展天线; 展开过程; 运动分析; 位置控制

中图分类号: V414; TH112 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2007)06-0916-06

Deployment kinematic analysis and control of hoop truss deployable antenna

LI Tuan-jie, ZHANG Yan, DUAN Bao-yan

(School of Electromechanical Engineering, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: Based on the structural characteristics of the hoop truss deployable space antenna, body-fixed coordinates are attached at the hoop modules, and the motion transformation relation between two hoop modules is derived using the method of coordinate transformation. The general model for deployment kinematic analysis is established. The model can be applied to carry out the position, velocity and acceleration analysis of any point on the structure. In order to avoid too large an impact in the deployable process, the deployment velocity of the hoop module is planned. The motion relation between the driving cable and the hoop module is given. The motion planning of the hoop module is transformed into the motion control of the driving cable, which can realize the deploying position control of the antenna. Finally, numerical simulations show the control method can make the antenna calmly deploy following the specified deployable motion.

Key Words: hoop truss; deployable antenna; deployable process; kinematic analysis; position control

在未来先进的卫星通信、无线广播系统、地球观测、陆地遥感、深空探测和深空通信等领域, 大型可展开天线是必不可少的关键设备之一^[1~3]. 一些研究机构已经提出了许多可展结构设想和工程样机, 例如石墨索网结构、辅助肋索网结构、桅杆式索网结构、构架式索网结构和可充气式薄膜结构^[4,5]. 这些结构各具特点. 其中, 由可展桁架、前索网、后索网、竖向张力索、金属反射网、驱动装置等组成的周边桁架式可展天线结构^[6]与其他天线结构形式相比, 具有柔性大, 空间热稳定性好, 压缩比大的特点, 应用空间比较大, 且结构形式简单, 在一定范围内口径的增大不会改变天线的结构形式, 质量也不会成比例的增加, 是目前大型可展开天线理想的结构形式.

可展天线具有折叠和展开两种状态. 在卫星发射过程中处于收拢状态, 进入轨道后, 在没有人工干预的情况下天线自动展开进入工作状态. 展开过程是可展天线最容易出现故障的环节之一. 故障现象主要为两个

收稿日期: 2007-01-25

基金项目: 国家部委预研项目资助(51321040102)

作者简介: 李团结(1972-), 男, 教授, 博士.

方面:一是在太空中天线不能顺利展开;二是展开过程不平稳,使天线受到过大冲击而损坏.因此在设计阶段,进行可展天线展开过程仿真和展开性能预测研究是十分必要的.笔者研究了周边桁架式可展天线的展开过程运动分析和基于位置控制的展开过程控制策略.

图 1 所示为天线周边桁架单元展开原理示意图.周边桁架是由若干个平行四边形单元组合而成的,平行四边形单元是可折叠的.在每两个四边形单元对角线 BF, BD 索上施加相等的收缩驱动,可以使桁架从收拢状态展开.展开后,在另两条对角线 AE, CE 索上施加相等的收缩驱动,可以使桁架再次收拢.在展开和收拢过程中各个平行四边形单元同步变形,即各个平行四边形单元始终保持相同形状.连续的展开索依次穿过桁架单元的可伸缩对角杆 BF 和 BD (套筒机构),通过电机带动展开索收缩来使周边桁架展开.在节点 A, C, E 处各有一对同步齿轮,保证整个桁架在展开过程中的同步.当桁架运动至完全展开状态时,可伸缩对角杆 BF, BD 中的细管分别顶住顶点 F, D ,阻止其进一步运动.

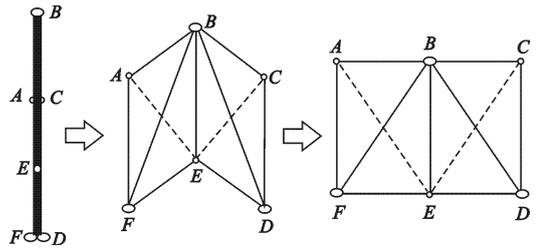


图 1 周边桁架单元展开原理示意图

1 桁架展开过程位置分析

图 2 为周边桁架展开到位后的示意图. $A_i B_i$ 为固定竖杆,给桁架的每个平行四边形单元编号.若周边桁架分为 n 段,则平行四边形单元的编号为从 1 到 n .第 1 号平行四边形单元对应 $X_1 O_1 Y_1$ 体坐标系,其上的点表示为 P_1 ;2 号单元对应 $X_2 O_2 Y_2$ 体坐标系,其上点表示为 P_2 ,依次类推.规定 $X_1 O_1 Y_1$ 体坐标系与惯性坐标系重合.每个平行四边形的 4 个顶点表示为 A_i, B_i, C_i 和 D_i, i 为对应单元的编号, $i = 1 \sim n$.则第 i 号单元的 C_i, D_i 点与第 $i+1$ 号单元的 B_{i+1}, A_{i+1} 重合.则第 i 号单元的坐标系 $X_i O_i Y_i$ 与第 $i+1$ 号单元的 $X_{i+1} O_{i+1} Y_{i+1}$ 的 X 轴正向夹角为 θ, θ 角是由桁架分段数 n 决定的: $\theta = 360^\circ/n$.

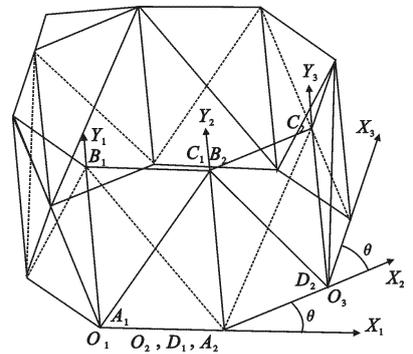


图 2 坐标描述

在展开过程中,从 $X_i O_i Y_i$ 坐标系到 $X_{i+1} O_{i+1} Y_{i+1}$ 坐标系的变换,可以看作把 $X_i O_i Y_i$ 坐标系先从 O_i 点 $(0, 0)$ 平移到 D_i 位置 (X_{D_i}, Y_{D_i}) ,然后再绕 Y_i 轴正向旋转 θ 角得到.则变换矩阵为

$${}^i T_{i+1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta & X_{D_i} \\ 0 & 1 & 0 & Y_{D_i} \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

所以,若坐标系 $X_{i+1} O_{i+1} Y_{i+1}$ 中有一点 $P_{i+1} = (P_{X_{i+1}}, P_{Y_{i+1}}, P_{Z_{i+1}}, 1)^T$,该点在 $X_i O_i Y_i$ 中表示为 $P_i = (P_{X_i}, P_{Y_i}, P_{Z_i}, 1)^T$,则它们之间的变换方程为

$$P_i = {}^i T_{i+1} P_{i+1} \quad (2)$$

在桁架展开过程中,相邻 2 个四边形单元的运动如图 3 所示.在每个单元的体坐标系中, AB 杆与 Y 轴重合, A 点与 O 点重合,且平行四边形上各点都在 XOY 平面内.设 AB 竖杆长为 R_1 , BC 弦杆长为 R_2 .在桁架展开过程中,奇数单元的 φ 角为正,偶数单元的 φ 角为负.则 D 点的坐标为

$$\begin{cases} X_{D_i} = R_2 \cos \varphi, Y_{D_i} = R_2 \sin \varphi, & i \text{ 为奇数,} \\ X_{D_i} = R_2 \cos \varphi, Y_{D_i} = -R_2 \sin \varphi, & i \text{ 为偶数.} \end{cases} \quad (3)$$

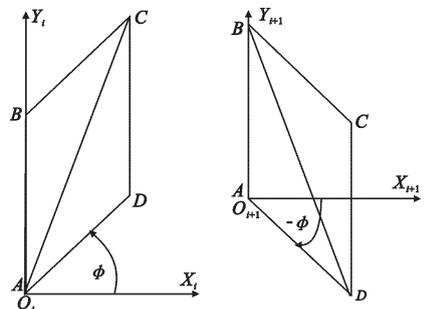


图 3 相邻 2 个单元的运动

若周边桁架分为 n 段,则 n 必须为偶数且 $n \geq 4$.把式(3)代入式(1)中可得到相邻两个坐标系之间的变换矩阵.体坐标系 $X_j O_j Y_j (j = 2 \sim n)$ 到惯性坐标系 $X_1 O_1 Y_1$ 的变换矩阵为

$${}^1\mathbf{T}_j = \prod_{i=2}^j {}^{i-1}\mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} \cos [(j-1)\theta] & 0 & \sin [(j-1)\theta] & \left\{ \sum_{i=2}^j \cos [(j-2)\theta] \right\} R_2 \cos \varphi \\ 0 & 1 & 0 & 0.5[1 - (-1)^{j-1}] R_2 \sin \varphi \\ -\sin [(j-1)\theta] & 0 & \cos [(j-1)\theta] & -\left\{ \sum_{i=2}^j \sin [(j-2)\theta] \right\} R_2 \cos \varphi \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

周边桁架在展开过程中,其上任意点 \mathbf{P}_1 在惯性坐标系下的位置坐标可用

$$\mathbf{P}_1 = {}^1\mathbf{T}_j \mathbf{P}_j \quad (5)$$

来表示,其中 \mathbf{P}_j 为该点在其体坐标系 $X_j O_j Y_j$ 中的位置坐标.

2 桁架展开过程速度和加速度分析

式(5)两边对时间 t 求一阶导,则可得速度变换方程,求二阶导可得加速度变换方程.即

$$\dot{\mathbf{P}}_1 = {}^1\dot{\mathbf{T}}_j \mathbf{P}_j + {}^1\mathbf{T}_j \dot{\mathbf{P}}_j \quad (6)$$

$$\ddot{\mathbf{P}}_1 = {}^1\ddot{\mathbf{T}}_j \mathbf{P}_j + 2 {}^1\dot{\mathbf{T}}_j \dot{\mathbf{P}}_j + {}^1\mathbf{T}_j \ddot{\mathbf{P}}_j \quad (7)$$

如图 2 所示,因为周边桁架第 i 号单元的 C_i, D_i 点与第 $i+1$ 号单元的 B_{i+1}, A_{i+1} 重合,若要求第 i 号单元的 C_i, D_i 点的速度和加速度,可转化为求 $i+1$ 号单元内 B_{i+1}, A_{i+1} 的速度和加速度问题.这样可以方便的求出周边桁架各个节点的运动参数,若要求桁架上任意点的运动参数,则用单构件方程求解即可.因为 A_i, B_i 点与其体坐标系 $X_i Y_i Z_i$ 无相对运动,式(6),(7)中不会出现含 $\dot{\mathbf{P}}_n$ 与 $\ddot{\mathbf{P}}_n$ 的项,方程求解更加简便.

对于体坐标系 $X_j O_j Y_j$ 中的点 \mathbf{P}_j ,用 $V_{X_1}, V_{Y_1}, V_{Z_1}$ 表示其在惯性系 $X_1 Y_1 Z_1$ 中的速度分量,用 $A_{X_1}, A_{Y_1}, A_{Z_1}$ 表示其在惯性系 $X_1 Y_1 Z_1$ 中的加速度分量.则由式(6)和(7)可得

$$\begin{cases} V_{X_1} = -\left\{ \sum_{i=2}^j \cos [(i-2)\theta] \right\} R_2 \dot{\varphi} \sin \varphi \\ V_{Y_1} = 0.5[1 - (-1)^{j-1}] R_2 \dot{\varphi} \cos \varphi \\ V_{Z_1} = \left\{ \sum_{i=2}^j \sin [(i-2)\theta] \right\} R_2 \dot{\varphi} \sin \varphi \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} A_{X_1} = -\left\{ \sum_{i=2}^j \cos [(i-2)\theta] \right\} R_2 (\dot{\varphi}^2 \cos \varphi + \ddot{\varphi} \sin \varphi) \\ A_{Y_1} = 0.5[1 - (-1)^{j-1}] R_2 (-\dot{\varphi}^2 \sin \varphi + \ddot{\varphi} \cos \varphi) \\ A_{Z_1} = \left\{ \sum_{i=2}^j \sin [(i-2)\theta] \right\} R_2 (\dot{\varphi}^2 \cos \varphi + \ddot{\varphi} \sin \varphi) \end{cases} \quad (9)$$

天线的展开是通过电机带动展开索收缩来实现的,有必要建立驱动索长度的变化与周边单元展开角度 φ 变化之间的关系.如图 3 所示,由展开单元的几何关系可得对角线长度 L 与展开角 φ 之间的运动关系为

$$\varphi = \arccos \left((R_1^2 + R_2^2 - L^2) / (2R_1 R_2) \right) - (\pi/2) \quad (10)$$

$$\dot{\varphi} = L\dot{L} / (R_1 R_2 \cos \varphi) \quad (11)$$

$$\ddot{\varphi} = (\dot{L}^2 + L\ddot{L} + R_1 R_2 \dot{\varphi}^2 \sin \varphi) / (R_1 R_2 \cos \varphi) \quad (12)$$

3 基于位置控制的展开过程控制策略

由于周边桁架可展开天线具有尺寸大、质量轻、柔性大的特点,因此其展开过程将是慢变的低频展开运动与快变的高频结构振动的强耦合过程.然而,当采用电机作为驱动力源,其展开过程很慢时,天线的展开将主要表现为结构的低频慢变展开,高频振动可以忽略.可通过上面已经得出的机构运动学模型,利用位置控制的策略对其进行展开控制^[7].

如图 3 所示,奇数单元中 AD 杆与体坐标系 X 轴之间的夹角为 φ ,展开起始($t = 0$)时 φ 为 90° ,展开结束($t = T$)时 φ 为 0. 展开过程中, φ 展开得是否平稳,直接影响展开过程是否会出现大的振动. 因此有必要对周边单元的展开过程进行运动规划. 规划展开角 φ 的速率变化规律为 $\dot{\varphi} = f(t)$,对其积分,可得 φ 的变化函数

$$\varphi = \int f(t) dt + C \quad (13)$$

式中 C 为保证函数连续而待确定的量.

根据式(10)和式(13)可得展开单元对角线长度 L 与展开时间 t 之间的关系为

$$L = \left(R_1^2 + R_2^2 + 2R_1R_2 \sin \left[\int f(t) dt + C \right] \right)^{1/2} \quad (14)$$

进而可得斜向拉索的收缩速度 \dot{L} 与 t 之间的关系为

$$\dot{L} = \left(-R_1R_2 \cos \left(\int f(t) dt + C \right) f(t) \right) / L \quad (15)$$

斜向拉索收缩加速度 \ddot{L} 与 t 之间的关系为

$$\ddot{L} = - \left(R_1R_2 \sin \left(\int f(t) dt + C \right) f^2(t) + R_1R_2 \cos \left(\int f(t) dt + C \right) f'(t) + \dot{L}^2 \right) / L \quad (16)$$

这样就从机构运动学的角度,得出了天线在整个展开过程中,展开单元对角线长度 L 的变化与每一个展开时刻 t 的对应关系. 当对天线的展开实施位置控制时,即电机输出的线位移长度对应着输入脉冲的个数,电机输出的线速度对应着脉冲输入的频率,这样就可以按照规划好的展开角的变化曲线平稳地控制天线的展开过程.

4 实例仿真

设周边桁架为 8 段,竖杆 $R_1 = 1500$ mm,弦杆 $R_2 = 1000$ mm,规划展开角 φ 的速率变化曲线如图 4 所示,即

$$\dot{\varphi} = \begin{cases} kt & , & 0 \leq t < T/5 \\ \frac{kT}{5} & , & T/5 \leq t < 4T/5 \\ k(T-t) & , & 4T/5 \leq t \leq T \end{cases} \quad (17)$$

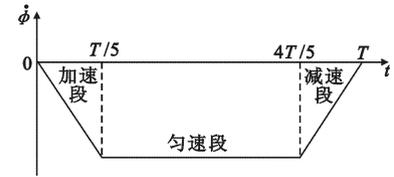


图 4 周边单元展开过程角速度图

因为
$$\varphi_{\text{end}} = \int_0^{T/5} kt dt + \int_{T/5}^{4T/5} \frac{kT}{5} dt + \int_{4T/5}^T k(T-t) dt = -\frac{\pi}{2} \quad (18)$$

可解得 $k = -25\pi/(8T^2)$.

对式(17)积分可得每个时间段内 φ 的变化

$$\varphi = \begin{cases} kt^2/2 + \pi/2 & , & 0 \leq t < T/5 \\ kTt/5 + C_1 + \pi/2 & , & T/5 \leq t < 4T/5 \\ -kt^2/2 + kTt + C_2 + \pi/2 & , & 4T/5 \leq t \leq T \end{cases} \quad (19)$$

为保证 φ 在 $[90^\circ, 0]$ 范围为时间的连续函数, $C_1 = -kT^2/50, C_2 = -17kT^2/50$. 把式(17), (19) 代入式(14) ~ (16) 中, 得到驱动索 L, \dot{L}, \ddot{L} 随时间 t 变化的规律, 根据式(5), (8)和(9)可求得在式(19)所规划的位置运动规律下, 桁架上任一点在惯性坐标系中的位置、速度和加速度.

展开所用总时间 T 设为 500 s. 1 号竖杆为机架杆. 编程仿真结果如图 5~图 9 所示. 因为桁架展开过程中各竖杆都作平动, 其上各点的速度、加速度都相等, 所以可取竖杆上任意一点来表示其运动, 现取各竖杆的质心点来描述各竖杆的运动. 展开过程中各竖杆的运动轨迹如图 5 所示. 可以看出, 展开过程中各竖杆的运动轨迹为多边形的相应顶点到机架杆顶点的连线. 各竖杆的速度分析结果如图 6~图 8 所示, 分别为各点在惯性坐标系下 X, Y, Z 方向的速度分量. 速度分析结果验证了该天线结构的对称性. 图 9 为桁架展开过程中不同时刻的结构状态, 天线可以按照规划的展开角变化规律平稳地展开.

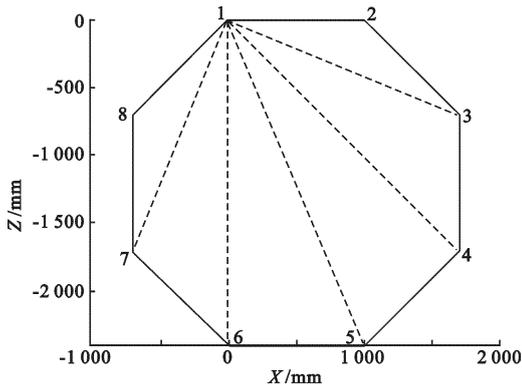


图 5 各竖杆的运动轨迹

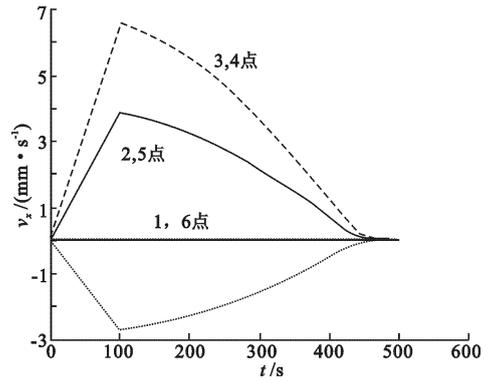


图 6 X 方向的速度分量

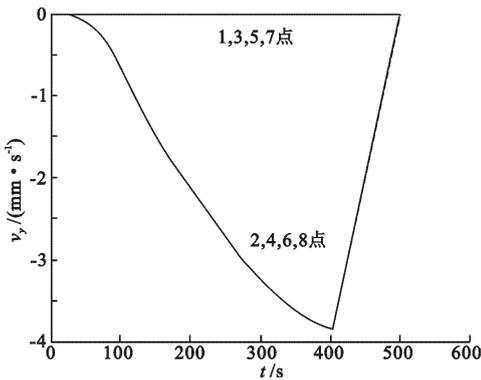


图 7 Y 方向的速度分量

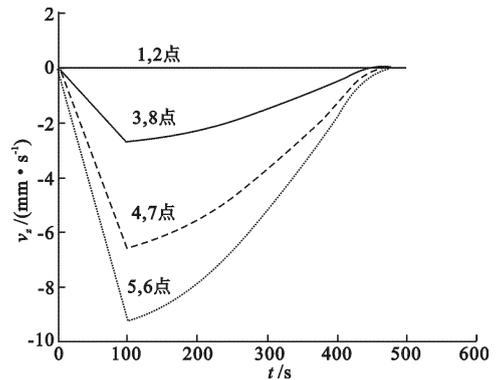


图 8 Z 方向的速度分量

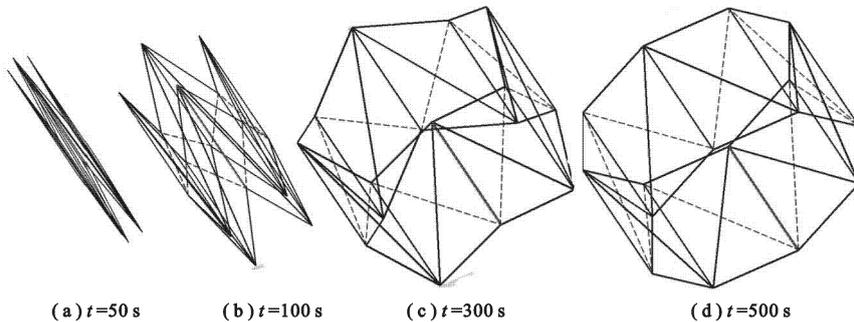


图 9 8 边桁架展开过程分析结果

5 结束语

建立了周边桁架式展开天线展开过程通用的运动分析模型,对不同结构参数的该类天线,可分析展开过程中结构上任意点的位置、速度和加速度,具有较强的实用性,而且为下一步的多刚体、多柔体展开动力学分析奠定了基础.研究了基于位置控制的展开过程控制策略,根据展开要求对周边单元的展开过程进行运动规划,根据结构几何关系,将周边单元的运动转化为展开装置的位移规划.通过对驱动绳索实施有效的运动控制,可以按照规划好的展开角的变化规律控制天线平稳地展开.

参考文献:

- [1] Clasen G, Langley R. Meshed Patch Antennas[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 2004, 52(6): 1412-1416.
- [2] Terada M, Bludworth N, Moore J, et al. Deployable Reflector System for Satellite Applications[C]//Brasília D F. 2005

- SBMO/IEEE MTT-S International Conference on Microwave and Optoelectronics. Brazil; IEEE, 2005; 647-649.
- [3] Zhang Jianguo, Chen Jianjun, Duan Baoyan. Reliability Analysis of the Deployment Mechanism of a Large Satellite Antenna Based on the Non-probabilistic Model[J]. Journal of Xidian University, 2006, 33(5): 739-744.
- [4] Meguro A, Harada S, Watanabe M. Key Technologies for High-accuracy Large Mesh Antenna Reflectors[J]. ACTA Astronautica, 2003, 53(2): 899-908.
- [5] Tibert G. Deployable Tensegrity Structures for Space Applications[D]. Stockholm; Royal Institute of Technology, 2002.
- [6] Thomson M W. The Astromesh Deployable Reflector [C]//IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium; 3. Orlando; IEEE, 1999; 1516-1519.
- [7] 段宝岩. 柔性天线结构分析、优化与精密控制[M]. 北京:科学出版社, 2005.

(编辑: 齐淑娟)

(上接第915页)

合于人工智能的克隆算子,利用免疫克隆算法优化相似度函数,并从理论上证明该算法具有全局收敛性.仿真实验证明,新算法不仅大大提高了获得全局最优解的概率,而且减轻了基于遗传的聚类算法在遗传后期的波动现象.但是如何选取适当的参数使得算法更加有效地解决无监督分类与识别问题是下一步工作的重点.

参考文献:

- [1] Gong M G, Du H F, Jiao L C. Optimal Approximation of Linear Systems by Artificial Immune Response[J]. Science in China, Series F; Information Science, 2006,49(1): 63-79.
- [2] Boriana L M, Marcos M C. Clustering Large Databases with Numeric and Nominal and Nominal Values Using Orthogonal Projections[C]//VLDB'2003. Berlin; Morgan Kaufmann, 2003; 1580-1585.
- [3] Hartigan J A, Wong M A. A K-Means Clustering Algorithm[J]. Applied Statistics, 1979, 28(1):100-108.
- [4] Maulik U, Bandyopadhyay S. Genetic Algorithm-based Clustering Technique[J]. Pattern Recognition, 2000, 33(9): 1455-1465.
- [5] Pal S K, Bandyopadhyay S, Murthy C A. Genetic Algorithms for Generation of Class Boundaries[J]. IEEE Trans on Systems, Man Cybernet, 1998, 28(6): 816-828.
- [6] Selim S Z, Ismail M A. K-means Type Algorithms; a Generalized Convergence Theorem and Characterization of Local Optimality[J]. IEEE Trans on Pattern Anal, 1984, 3(6): 81-87.
- [7] Hall L O, Ozyurt I B, Bezdek J C. Clustering with a Genetically Optimized Approach[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 1999, 3(2): 103-112.
- [8] Pan H, Zhu J, Han D. Genetic Algorithms Applied to Multiclass Clustering for Gene Expression Data[J]. Genomics, Proteomics & Bioinformatics, 2003, 1(4): 279-287.
- [9] 刘若辰, 杜海峰, 焦李成. 基于柯西变异的免疫单克隆策略[J]. 西安电子科技大学学报, 2004, 31(4): 551-557.
- [10] Swinburne R. Bayes's Theorem[M]. Oxford; Oxford University Press, 2002.
- [11] Clausi D A, Yue B. Comparing Cooccurrence Probabilities and Markov Random Fields for Texture Analysis of SAR Sea Ice Imagery[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(1): 215-228.

(编辑: 郭 华)