

基于时延差特征参数判别的牛顿迭代 振源定位搜索算法

冯立杰¹, 樊瑶²

1. 武警工程大学信息工程系, 西安 710086
2. 西藏民族学院信息工程学院, 咸阳 712000

摘要 时差定位系统的定位精度, 主要受时间差测量和传感器几何分布的影响。由于受环境的复杂性、目标的移动性和定位的实时性制约, 时延差准确与否一直是困扰研究人员的问题。本文提出一种基于信号特征参数判别的时延差误差估计方法, 应用该方法分别对牛顿迭代搜索定位算法的搜索初值和结束条件进行了改进: 首先利用各传感器的特征信息, 确定各传感器信号的信度; 其次, 选择3个可信度高的传感器进行目标定位, 其结果作为牛顿迭代搜索的初值, 避免了传统方法确定初值的复杂繁琐的计算; 第三, 将各传感器的信度作为牛顿迭代搜索结束条件的权值, 使得结束条件更合理、更贴近实际。实验证明了本算法定位精度高、鲁棒性强。

关键词 粗大时延误差; 牛顿迭代; 传感器信度; 定位精度

中图分类号 TP212

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.12.014

Newton iterative source localization search algorithm based on the time delay difference characteristic parameters discrimination

FENG Lijie¹, FAN Yao²

1. Information Engineering Department, Engineering University of CAPF, Xi'an 710086, China
2. College of Information Engineering, Tibet College of Nationalities, Xianyang 712000, China

Abstract The positioning accuracy of the TDOA location system is mainly influenced by the time difference measurement and the sensor geometry distribution. For the real-time positioning, due to the mobility and the complexity caused by the environmental goal control, the reasonable, efficient and accurate determination of the measured time delay difference is a plagued issue for researchers. To solve this problem, this paper proposes a method to estimate the error signal delay discrimination based on characteristic parameters. The Newton iterative search algorithm is improved to search for the initial positioning and the end condition. Firstly, the signal characteristic value information is used to establish credibility, then the initial position of the source is found through three sensors of high reliability, its results are taken as the initial values of Newton iteration to avoid the complicated calculation of the traditional method. Finally, with the reliability of each sensor as the weight of the Newton iteration termination condition, the end condition is more reasonable, more close to reality. The experiment shows that this algorithm has high precision and strong robustness.

Keywords gross time delay error; Newton iterative; sensor's credible degree; positioning accuracy

振源定位技术在桥梁监控、灾害防控、区域监视等领域得到了广泛的应用。通常振源定位包括基于振动强度的定位和基于到达时间差 TDOA (time difference of arrival) 的定

位^[1,2]。基于信号强度的定位技术算法简单实时性好, 但其定位精度不高^[3]。随着人们对时差测量精度和方便度要求的提高, 时差定位技术已经成为该领域的热点之一, 产生的定位

收稿日期: 2015-03-19; 修回日期: 2015-04-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60940007)

作者简介: 冯立杰, 副教授, 研究方向为嵌入式系统、数字信号处理, 电子信箱: fengljje@126.com

引用格式: 冯立杰, 樊瑶. 基于时延差特征参数判别的牛顿迭代振源定位搜索算法[J]. 科技导报, 2015, 33(12): 83-87.

算法也多种多样。贝叶斯估计^[4]对先验概率较敏感,且其数据处理精度较差、算法复杂度高。Chan算法^[5]随着TDOA测量误差的增大,其定位性能迅速下降,有时会无解。牛顿迭代^[6]和泰勒级数展开^[7]是将非线性问题转化为线性问题的常用方法,该类搜索算法具有定位精度高、算法简洁、鲁棒性强等特点,在工程上被广泛应用。另外,传统意义上的振动目标定位,在进行时延差测量时,由于环境复杂性和干扰源频发,导致测量的一致性差,甚至出现粗大误差,且粗大误差的出现概率急增。而粗大误差的出现严重影响搜索算法的精度和收敛速度。因此对于振动目标定位,时延误差的判别就显得十分必要。初始搜索坐标的确定和搜索结束条件的制定是影响牛顿搜索算法精度和搜索速度的主要因素。

本研究提出一种基于传感器信号特征参数判别时延误差的方法,运用该方法确定各传感器的信度,再通过信度高的3个传感器求出振源初始位置,并根据传感器的信度改进搜索迭代结束条件,然后利用牛顿迭代搜索法进一步确定振源位置。

1 基于特征参数判别的时延误差估计

特征分析是信号处理的关键技术之一,在多节点协同定位中,各个传感器收到信号的质量通常可用信号的特征参数描述。合理、高效的信号处理方法可以提取出能够充分反映目标特性的信息,为信号质量的判定提供可靠的证据支持。实际上,同一振源,各传感器信号在同一时间内的特征参数(如过零率、频谱宽度、频谱密度等)具有较强的相似性,通过比较信号特征参数偏离中心值的大小,就能区分各传感器接收信号的优劣,进而确定各传感器的可信度。

假设有 n 个传感器,每个传感器的信号有 m 个特征参数, $s_i(j)$ 为第 i 传感器的第 j 个特征参数,则 n 个传感器第 j 个特征参数的均值(即特征参数参考值)为

$$\bar{s}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} s_i(j)$$

定义第 i 个传感器关于特征参数 $s_i(j)$ 广义欧氏距离:

$$d_i(j) = \sqrt{[s_i(j) - \bar{s}(j)]^2} \quad (1)$$

其中 $i=0, 1, 2, \dots, n-1$,表示第 i 个传感器特征参数 $s_i(j)$ 偏离特征参考值的距离。

为便于分析比较不同特征参数的偏离距离,对上式归一化处理得到归一化的偏离距离

$$\xi_{ij} = \frac{d_i(j) - \min d_i(j)}{\max d_i(j) - \min d_i(j)} \quad (2)$$

因此,第 i 个传感器 m 个特征参数的归一化距离和 η_i 为

$$\eta_i = \sum_{j=0}^{m-1} \xi_{ij} \quad j=0, 1, 2, \dots, m-1 \quad (3)$$

再将 η_i 归一化处理 $\eta_i / \sum_{i=0}^{n-1} \eta_i$,即得到归一化后的第 i 个传感器 m 个特征参数的归一化距离和。则第 i 个传感器的信度为

$$\gamma_i = 1 - \eta_i / \sum_{i=0}^{n-1} \eta_i \quad (4)$$

显然,传感器信度越大,表明传感器的信号特征参数偏离参考特征中心值越近,即信号质量也就越好,由其确定的时延差也就越准确。

2 基于灰色判别的粗大时延误差剔除

粗大时延误差的存在,对定位算法的危害性很大,轻则影响定位精度,重则使得定位方程无解或者使搜索算法不收敛。因此,粗大误差的判断与剔除十分必要。

灰色判别准则实质上是利用灰色系统理论中的累加生成法^[8],通过对测量数据累加后得到累加曲线,从曲线的变化规律中获取误差信息并用于粗大误差的判别。根据测量值不确定度的灰评定^[9],在随机误差的作用下,测量累加曲线变化被约束在一个灰色三角域内(图1虚线所围三角形)。

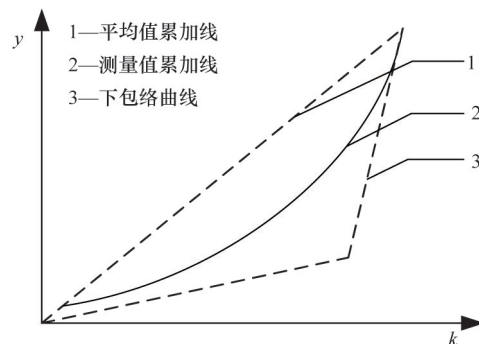


图1 粗大误差灰色判别的灰色区域

Fig. 1 Grey area of gross error gray judgment

图1中曲线2为构造的时延误差累加序列,其表达式为

$$y(k) = \sum_{i=1}^k x(i) \quad (5)$$

式中, $x(i)$ 为特征值误差数据序列,按照由小到大的顺序排列得到的新序列, k 为测量次数。图1上边界直线1为平均值累加序列,其表达式为

$$y_1(k) = \bar{x}k \quad (6)$$

其中, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x(i)$ ($i=1, 2, \dots, n-1$)。图1下边界虚线3方程为

$$y_2(k) = \begin{cases} \left[\bar{x} - \frac{h\Delta_{\max}}{p} \right] k & 1 \leq k \leq p \\ \bar{x}k - \frac{h\Delta_{\max}}{n-p}(n-k) & p \leq k \leq n \end{cases} \quad (7)$$

其中, h, p, Δ_{\max} 为灰色三角形边界参数,通常 h 为常数,一般取 $3.75^{[10]}$; $\Delta_{\max} = \max\{\bar{x}k - y(k)\}$ 当 n 为偶数时, $p=n/2$;当 n 为奇数时, $p=(n+1)/2$ 。

粗大误差的判据^[11]为:若 $\Delta_1=y(1)-y_2(1)>0$, $\Delta_n=y(n-1)-y_2(n-1)>0$ 则无粗大误差;若 Δ_1 为负,则 $y(1)$ 对应的时差为粗大误

差;若 Δ_i 为负,则 $y(n-1)$ 对应的时差为粗大误差。特征值误差数据序列是按照由小到大的顺序排列得到,因此粗大误差只可能出现在 $y(k)$ 两端,不会出现 Δ_i 和 Δ_n 同时为负情况。需要说明的是每次只能剔除一个粗大误差,重复上述过程,直到粗大误差剔除完为止。

判断粗大时延误差的判别方法步骤为:1) 根据传感器得到数据样本,提取各传感器的特征参数;2) 求出特征参数平均值序列即特征参数参考序列;3) 计算各传感器特征值的归一化偏离距离和,得到误差序列;4) 将误差序列按由小到大排列;5) 构造误差累加序列和平均值累加序列,计算获得灰色三角形下边界方程;6) 判断有无粗大误差,若有,则由剔除规则剔除;7) 降维处理,将含有粗大时延误差的方程去除。

3 基于传感器信度的牛顿迭代搜索算法

3.1 经典的牛顿迭代搜索算法

牛顿迭代搜索的基本思想是将双曲线方程在搜索初始坐标处,将非线性方程转变为线性问题^[10],然后从初始坐标开始,以一定步长进行搜索,直到满足搜索结束条件为止,最终求得最优解。图2为目标定位示意图。

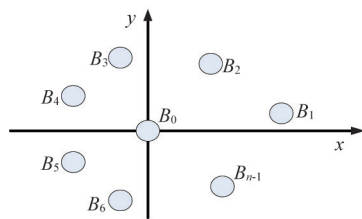


图2 振源定位示意

Fig. 2 Vibratory source localization

设有 n 个传感器参与目标定位,传感器坐标为 $B_i(x_i, y_i)$ ($i=0, 1, 2, \dots, n-1$),振源目标到第 i 个传感器的距离为 r_i ($i=0, 1, 2, \dots, n-1$);振源到第 i 个传感器与到第0个传感器之间的时间差为 τ_{i0} 、距离差为 r_{i0} ,则 $r_{i0} = r_i - r_0$ 。

据此可建立 $n-1$ 个定位方程为

$$r_{i0} = c\tau_{i0} = r_i - r_0 \quad (8)$$

其中, $i=1, 2, \dots, n-1$; c 为振动传播速度。

根据文献[10],式(8)变换为

$$(x_i - x_0)x + (y_i - y_0)y + r_{i0}r_0 = s_i \quad (9)$$

其中,

$$s_i = \frac{1}{2}(x_i^2 + y_i^2 - x_0^2 - y_0^2 - r_{i0}^2)$$

$$r_0 = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$$

$$r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad i=1, 2, \dots, n-1$$

牛顿迭代算法的本质是在选定的初值 $x(0)$ 、 $y(0)$ 附近,将非线性问题进行线性化处理,式(10)是非线性方程组,该方程组的求解就转化为无约束条件的非线性最优化问题。

根据方程(9)构造如下方程组^[3]:

$$F_i(x, y) = r_i - r_0 - c\tau_{i0} = 0 \quad (10)$$

其中, $i=1, 2, \dots, n-1$ 。

式(10)中,取 $i=1, 2$,其雅可比矩阵为

$$F'(x, y) = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x} & \frac{\partial F_1}{\partial y} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x} & \frac{\partial F_2}{\partial y} \end{bmatrix}$$

当满足 $\frac{\partial F_1}{\partial x} \frac{\partial F_2}{\partial y} \neq \frac{\partial F_2}{\partial x} \frac{\partial F_1}{\partial y}$ 时,振源的位置坐标利用牛顿迭代法可以表示为

$$\begin{bmatrix} x^{(k+1)} \\ y^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x^{(k)} \\ y^{(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x} & \frac{\partial F_1}{\partial y} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x} & \frac{\partial F_2}{\partial y} \end{bmatrix}_{x=x^{(k)}, y=y^{(k)}}^{-1} \times \begin{bmatrix} F_1(x^{(k)}, y^{(k)}) \\ F_2(x^{(k)}, y^{(k)}) \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中, $k=0, 1, 2, \dots$ 为搜索次数; $(x(k), y(k))$ 为迭代初值; $(x(k+1), y(k+1))$ 为迭代后的位置坐标。

距离差累加和可以由公式(12)求得

$$\varepsilon = \sum_{i=3}^{n-1} F_i(x, y) = \sum_{i=3}^{n-1} |r_i - r_0 - c\tau_{i0}| \quad (12)$$

则搜索结束条件为

$$\varepsilon \leq \delta \quad (13)$$

其中, δ 为满足搜索精度要求的最小误差。

3.2 牛顿迭代搜索算法的改进

3.2.1 初始坐标确定方法的改进

牛顿迭代算法的关键是搜索初值的选择,若搜索初值的选取距离目标较远,则由双曲线方程线性化后,在目标坐标附近由非线性转换为线性产生的误差就大,势必影响定位精度,严重时会出现无最优解的情况;同时搜索初值对搜索收敛速度也有重要影响。

文献[3]采用最小二乘法估计初始坐标,其方法如下:在式(11)中,任取2个方程,运用Fang算法求出其解,共有 $k=C_{n-1}^2$ 组解,然后运用最小二乘法求出最终解,作为牛顿迭代初值。该方法主要缺点有两点:一是算法复杂,当传感器数目较多时,计算量较大;二是计算过程中没有考虑时差的可信度,当系统误差较大或有粗大误差时,计算的初始坐标准确性差。

本算法确定搜索初始坐标的方法如下:

1) 选择并提取传感器信号特征参数(如过零率、振动持续时间、功率谱等)。

2) 根据式(4)计算出各传感器的信度。

3) 从 $n-1$ 个方程组中选取可信度大的2个方程并求解,可得振源最优估计坐标 $x(0)$ 、 $y(0)$ 。

3.2.2 搜索结束条件的改进

文献[3]、[4]的结束条件为

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^{n-1} |r_i - r_0 - c\tau_{i0}| \leq \delta \quad (14)$$

式(14)没有考虑时延差的可信度,认为所有时延差均为可信

的。在各个传感器信号质量较好时,搜索结果较准确;由于环境的复杂性,外界干扰的频发性,各传感器受干扰程度会出现差异,在目标位置附近搜索时,时延误差大的传感器对误差累加和的贡献就大,特别是粗大误差的出现,会使得搜索的结果偏离或严重偏离真实目标位置,甚至出现无解。

本算法的结束条件为

$$\varepsilon = \sum_{i=3}^{n-1} \gamma_i |r_i - r_0 - c\tau_{i0}| \leq \delta$$

其中, γ_i 为第 i 个传感器的信度,由式(4)计算得出。

3.2.3 改进后的牛顿定位搜索算法流程

改进的牛顿迭代搜索定位方法见图3。

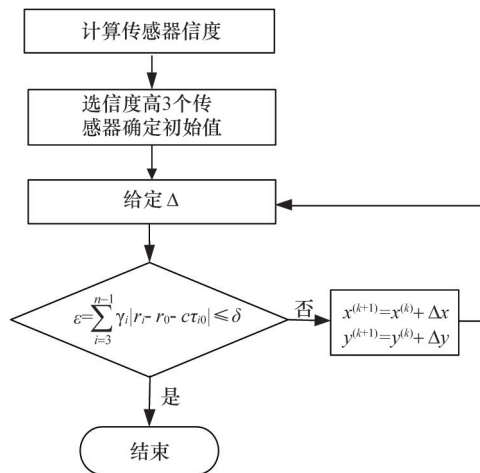


图3 定位算法流程

Fig. 3 Flow chart of the localization algorithm

4 结果及分析

4.1 牛顿迭代算法和本文算法鲁棒性比较 Matlab 仿真

设传感器的分布为五元十字阵,其坐标分别为(0,0), (100,0), (0,100), (-100,0), (0,-100),并且设振源目标的初始位置为(100,30)。采样速率1 kHz,采样窗口为2 s,为简化起见,本算法中的信号特征只选用过零率。本算法以第一个传感器的位置为坐标参考原点,设时延误差的标准差 σ_n 从0增长至100 ms,间隔4 ms,对每个 σ_n 进行100次 Monte Carlo 仿真实验并对运行结果求均值,得到结果如图4所示。

图4(a)为牛顿迭代算法和改进的牛顿迭代定位算法在纵坐标 y 轴上不同 σ_n 下的定位估计值,图4(b)为两种算法在横坐标 x 轴上不同 σ_n 下的定位估计值。纵轴为结果均值,单位为m。可以看出,改进的牛顿迭代定位算法比牛顿迭代算法^[3]更加准确;随着误差标准差 σ_n 的增大,改进的牛顿迭代定位算法和原算法的测量误差均越来越大,但改进的牛顿迭代定位算法均值较原算法均值浮动较小,因此更加稳定;当误差标准差大于40 ms时,原算法测量结果与目标真实值相差较大,其误差越来越大,而随着TDOA误差越来越大,改进的牛顿迭代定位算法均值基本能保持平稳,仍然可以比较准确地计算出目标的真实位置。

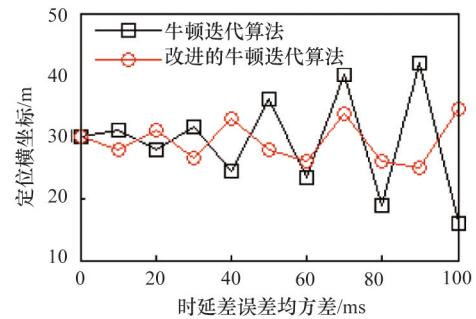
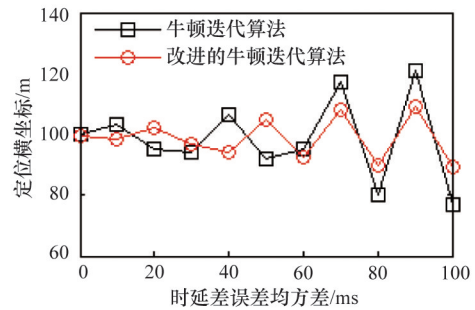


图4 两种算法鲁棒性比较

Fig. 4 Robustness of two kinds of algorithms

4.2 两种定位算法定位精度比较仿真

通常衡量定位结果准确程度的指标包括定位均方误差(MSE)、均方根误差(RMSE)以及几何精度衰减因子(GDOP)等。本文以定位的均方根误差RMSE为算法的评价指标。在二维定位估计中,对于均方误差(MSE)、均方根误差(RMSE),有

$$MSE = E[(x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2]$$

$$RMSE = \sqrt{E[(x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2]}$$

其中, (x, y) 为振源目标的实际位置坐标, (\hat{x}, \hat{y}) 为振源的估计位置坐标,仿真结果如图5所示。

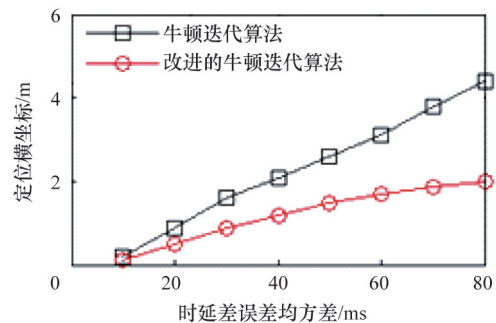


图5 两种定位算法定位均方误差

Fig. 5 Positioning mean square error of two localization algorithms

由图5可以看出,在误差相同时,改进的牛顿迭代定位算法的定位均方误差RMSE明显低于原始的牛顿迭代定位算

法, 即其定位的稳定性要明显高于原牛顿迭代算法。改进的牛顿迭代定位算法受误差标准差 σ 的影响程度要小于原始的牛顿迭代定位算法。且随着误差标准差 σ 的增大, 两种算法的定位性能均有所下降, 甚至可能出现无解的情况, 但是通过仿真可以看到改进的牛顿迭代定位算法在测量误差很大的情况下相较于其他算法仍然保持较高的定位精度。

5 结论

提出的定位算法, 通过特征参数判别得到传感器的信度并对粗大误差进行了剔除, 更好地解决了搜索算法的初始值问题, 并根据传感器的信度改进了搜索结束条件, 提高了定位精度和算法的鲁棒性。本算法适应于多传感器系统, 接收到信号的传感器越多其性能越好, 反之, 其优越性不明显。

参考文献 (References)

- [1] Caffery Jr J J. A new approach to the geometry of TDOA location[J]. IEEE Transactions on VTC, 2000, 4(9): 1943-1949.
- [2] Ding G L, Liu Z F. An all-fiber optic accelerometer based on compliant cylinder[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(3): 340-343.
- [3] 冯立杰, 樊瑶. 基于 D-S 证据理论的多传感器多特征目标识别研究[J]. 科技导报, 2014, 32(15): 32-36.
Feng Lijie, Fan Yao. Target identification study of multi-sensor based on D-S evidence theory characteristics[J]. Science & Technology Review, 2014, 32(15): 32-36.
- [4] 朱亚坤, 冯立杰. 基于牛顿迭代搜索法的多节点协同振源定位研究[J]. 传感技术学报, 2011(9): 1322-1325.
Zhu Yakun, Feng Lijie. Research on more nodes collocation excitation source based on newton iterative method[J]. Journal of Sensors and Actuators, 2011(9): 1322-1325.
- [5] 冯立杰, 樊瑶. 基于粗大误差灰色判别的泰勒级数展开振源定位搜索算法[J]. 西北师范大学学报: 自然科学版, 2014(11): 49-53.
Feng Lijie, Fan Yao. Taylor's Series expansion search vibratory source localization algorithm based on the gross error gray discriminant[J]. Journal of Northwest Normal University: Nature Science Edition, 2014 (11): 49-53.
- [6] 章坚武, 唐兵, 秦峰. Chan 定位算法在三维空间定位中的应用[J]. 计算机仿真, 2009(1): 323-326.
Zhang Jianwu, Tang Bing, Qin Feng. Application of Chan location algorithm in 3-dimensional space location[J]. Computer Simulation, 2009(1): 323-326.
- [7] Foy W H. Position-location solutions by taylor series estimation[J]. IEEE Transcation on Aerospace and Electronic Systems, 1976, 12(3): 187-194.
- [8] 邓聚龙. 灰色系统理论教学[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990: 24-60.
Deng Julong. Gray system theory teaching[M]. Wuhan: Huazhong University Press, 1990: 24-60.
- [9] Chan Y T, Ho K C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(8): 905-1915.
- [10] 刑翠柳, 陈建民. 多站无源时差定位精度分析[J]. 信号与信息处理, 2012, 42(2): 32-34.
Xing Cuiliu, Chen Jianmin. Analysis on positioning accuracy of TDOA passive location by multi-tation[J]. Radio Engineering, 2012, 42(2): 32-34.
- [11] 杨林, 周一宇, 孙仲康. TDOA 被动定位方法及精度分析[J]. 国防科技大学学报, 1998, 20(2): 49-53.
Yang Lin, Zhou Yiyu, Sun Zhongkang. TDOA passive location and accuracy analysis[J]. Journal of National University of Defense Technology, 1998, 20(2): 49-53.

(责任编辑 刘志远)

·学术动态·



中国科协 2014 年度事业发展统计: 组织建设

2014 年, 各级科协组织 3222 个; 中国科协所属全国学会和委托管理学会 200 个; 各省级科协所属省级学会 3938 个。各级科协从业人员 38725 人; 中国科协所属全国学会从业人员 3334 人, 委托管理学会从业人员 162 人; 各省级科协所属省级学会从业人员 20418 人。

全国学会个人会员 437 万人; 省级学会个人会员 712 万人, 比上年增加 82 万人。全国学会团体会员 56171 个, 比上年增加 118 个; 省级学会团体会员 184357 个, 比上年增加 1480 个。

企业科协 21931 个, 比上年增加 650 个, 个人会员 350 万人, 比去年增加 3 万人。

高校科协 703 个, 比去年增加 119 个, 个人会员 76 万人, 比上年增加 31 万人。

街道科协(社区科协) 11179 个, 比上年增加 2112 个, 个人会员 67 万人, 增加 5 万人; 乡镇科协 30236 个, 比上年减少 668 个, 个人会员 212 万人, 与上年相比增加 1 万人。

农技协 110442 个, 个人会员 1466 万人。其中, 在民政部门注册的农技协 39593 个, 占农技协总数的 36%。

在基层直接为公众提供科普服务的专兼职科普工作者 67 万人, 比上年增加 11 万人。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35096/n10225918/16431676.html>。