

多无人机协同区域覆盖搜索算法的改进

吴青坡, 周绍磊, 尹高扬, 刘伟

(海军航空工程学院控制工程系, 山东烟台 264001)

摘要: 目前,国内外对完全未知环境下多无人机(UAV)区域覆盖搜索算法的研究中,常用的搜索样式主要有“Z”字形(或“之”字形)和内螺旋式两种。在考虑 UAV 转弯半径限制情况下,“Z”字形搜索方法需在目标区域边缘外部进行转弯,造成搜索资源的浪费;内螺旋方式则在接近区域中心时候需要过多的转弯,不利于执行搜索任务。针对两种方式的缺点,在保证区域覆盖和 UAV 动力学约束的基础上,按相应原则对执行搜索任务 UAV 编队中各 UAV 的转弯时机和转弯位置进行调整,对常用区域覆盖搜索方法进行了改进。理论分析和仿真结果表明,改进后的搜索方法不仅可以更高效地完成区域覆盖搜索任务,还可有效增强在部分传感器或 UAV 损坏情况下的编队的重构能力。

关键词: 无人机; 搜索决策; 覆盖搜索; 编队重构

中图分类号: V279; TP242

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2016)01-0080-05

Improvement of Multi-UAV Cooperative Coverage Searching Method

WU Qing-po, ZHOU Shao-lei, YIN Gao-yang, LIU Wei

(Department of Control Engineering, Naval University of Aeronautics and Astronautics, Yantai 264001, China)

Abstract: The common search patterns for cooperative coverage search methods of multiple Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) under unknown environment are zigzag and spiral patterns. Considering the constraints of the UAV's turning radius, the zigzag pattern needs to make turning out of the search area, which can result in longer total path lengths, while the spiral pattern may result in large number of turns, especially near the center of the area. Focusing on the shortcomings of these two patterns, we derived an improved search pattern based on the guarantee of area coverage and dynamic constraints of UAVs. The moments and positions of each UAV's turning were adjusted according to the corresponding rules. Theoretical analysis and simulation results show that, the improved method can not only work better than zigzag and spiral patterns, but also have good ability of formation reconstruction when partial sensors or UAVs are damaged.

Key words: Unmanned Aerial Vehicle (UAV); search strategy; coverage search; formation reconstruction

0 引言

目前,针对不确定环境下多无人机(UAV)协同搜索静止目标问题,国内外主要将其视为覆盖航迹规划问题来研究,解决方法大多来源于地面机器人路径规划技术,如光栅扫描、庄稼收割、剪草机样式等。由于 UAV 在运动时需要考虑飞行时间、转弯半径等因素的约束,通常不能直接使用地面机器人的路径规划技术来解决 UAV 所面临的问题^[1]。文献[2]认为任意形状

的搜索区域均可用其外接矩形来表示,并给出了单架 UAV 在矩形区域内往复前进式(即“Z”字形)搜索方法;文献[3]则将单架 UAV 的搜索样式设计为内螺旋式;文献[4-5]给出了多 UAV 的协同广域搜索模式,安排多 UAV 共同进行“Z”字形搜索;文献[6]针对 UAV 编队搜索运动目标情况,提出了运动目标垂线搜索和运动目标斜线搜索方法;文献[7-8]则在环境先验信息及对目标分布预测的基础上,根据搜索图方法,采用相关算法进行协同搜索决策。

环境信息未知情况下,针对多 UAV 协同搜索静止目标问题,文献[7-8]所采用的搜索图方法并不能发挥其相应优势,目前主要采用“Z”字形和内螺旋两种

收稿日期:2015-01-07

修回日期:2015-11-22

作者简介:吴青坡(1985—),男,河南南阳人,博士生,研究方向为多无人机协同控制技术。

搜索样式,这两种方式各有优缺点,研究者们对两种搜索方式褒贬不一^[9-11]。然而,上述各研究成果中,多数情况下忽略 UAV 动态约束,“Z”字形搜索方法因 UAV 最小转弯半径限制,为保证搜索区域全覆盖,需在区域外部进行转弯,这样搜索路径变长,造成了搜索资源浪费,降低了编队搜索效率。内螺旋方法则需要较多转弯^[12],接近区域中心时需要更多,在需要进行编队并排搜索时,由于编队内外两侧 UAV 的飞行路径长短相差较大,要求各 UAV 速度差异较大,不利于工程实现。此外,目前很少有研究者考虑多编队中无人机出现故障情况下如何维持编队继续搜索问题。本文在分析两种搜索方式特点的基础上,通过调整 UAV 编队中各 UAV 的转弯时机和转弯位置,对传统的区域覆盖搜索方法进行改进,理论分析和仿真结果表明,改进后的搜索方法在满足 UAV 转弯半径等动力学约束的情况下,可以很好地完成协同区域覆盖搜索任务。

1 问题描述

不确定环境是指对目标区域内环境信息完全未知(或仅知道很少一部分)的搜索环境,即对区域内所有障碍、目标位置等信息完全未知。为分析方便,记搜索目标区域 E 为 $L \times W$ 的矩形区域,其中, L 表示区域长度, W 表示区域宽度。区域内目标的个数及位置均未知。假定所有执行搜索任务的 UAV 都比较简单,具有完全相同的性能, N_s 架 UAV 以恒定速度 v_s 在固定高度飞行,机载传感器固定安装在 UAV 上,探测半径为 R_s ,无人机最小转弯半径为 R_c ,且 $R_c > R_s$ 。研究目的是寻找一种搜索策略,以尽可能少的 UAV 尽快完成对指定区域内所有目标的搜索任务。

为保证完成区域覆盖搜索任务而不会遗漏目标和提高搜索效率,在对上述环境的搜索方法进行分析时需要遵守以下原则:

- 1) 无人机数量 $N_s < \frac{W}{2R_s}$, 即 UAV 不可能按编队不经历转弯就可完成整个目标区域搜索任务;
- 2) UAV 从搜索区域的左边界(或右边界)开始起飞(区域最左端到最右端距离为 L);
- 3) 在确定边界后,UAV 编队应该选择从边界的最下端(或最上端)起飞,这样可以确定 UAV 在到达另一边界时的转弯方向为左转弯(或右转弯)。

2 改进覆盖搜索模型

假定搜索区域如图 1 中矩形区域 $ABCD$ 所示。

改进后静止目标的多无人机协同覆盖搜索策略描述如下(图 1 中以 2 架 UAV 为例)。图中: L, W, R_s, R_c ,

表示含义与前文所述相同; a_1, b_1, \dots, j_1 和 a_2, b_2, \dots, j_2 分别为无人机航路点。

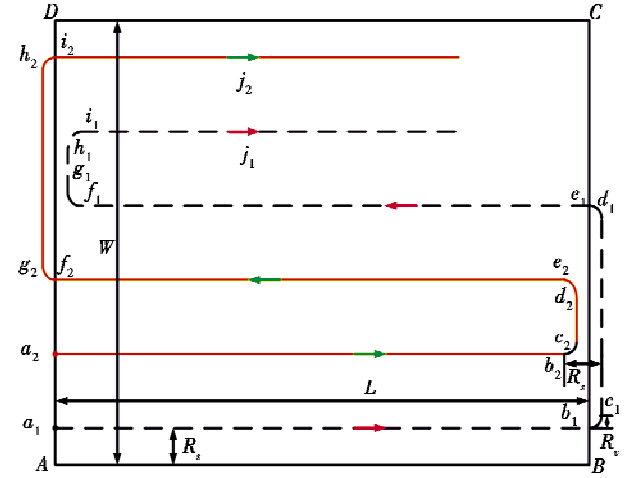


图 1 UAV 编队协同区域覆盖搜索

Fig. 1 Cooperative coverage search of multi-UAV formation

1) 设定区域左下方顶点 A 为原点,将 UAV 从最下方到最上方按 $1, 2, \dots, N_s$ 进行编号,指派 N_s 架 UAV 排成一排从区域左边界下侧 A 点开始起飞,速度方向水平向右,并假定最下方 UAV₁ 起飞位置为 a_1 , $|Aa_1| = R_s$,编队每相邻两架 UAV 之间间隔为 $2R_s$,则 N_s 架 UAV 组成编队的搜索宽度为 $N_s \cdot 2R_s$,故 $N_s < \frac{W}{2R_s} < \frac{L}{2R_s}$ 情况下, UAV 编队覆盖搜索轨迹才有可能进行“Z”字形搜索,反之, N_s 架 UAV 组成一排横队,无需转弯即可完成区域覆盖搜索。

2) 当 UAV₁ 到达右边界 BC 上的 b_1 点后,以最小转弯半径 R_c 进行左转弯,经由 $\widehat{b_1c_1}$ - 直线 $|c_1d_1|$ - 左转弯 $\widehat{d_1e_1}$ 飞行;为提高协同搜索效率,本文规定其他 UAV 不必飞行到右边界 BC 后再进行左转弯,只需当 UAV _{n} 到达 b_n 点时,以最小转弯半径 R_c 经由点 $b_n \rightarrow c_n \rightarrow d_n$ 进行“左转弯 - 直线 - 左转弯”飞行,假定 b_n 距离右边界 BC 的距离为 L_n ,可得

$$L_n = (n-1)(R_s - R_c) \quad n=2, 3, \dots, N_s. \quad (1)$$

图 1 中仅以两架 UAV 为例进行显示,其中, b_2 距离右边界 BC 的长度为 $L_2 = R_s - R_c$ 。UAV₁ 转弯过程中飞行路径长度为 $\widehat{b_1c_1} = \widehat{d_1e_1} = \frac{\pi R_c}{2}$, $|c_1d_1| = (4 \cdot N_s - 2)R_s - 2R_c$,对 UAV _{n} ,可得

$$\widehat{b_n c_n} = \widehat{d_n e_n} = \frac{\pi R_c}{2}, |c_n d_n| = (4(N_s - n) + 2)R_s - 2R_c. \quad (2)$$

3) UAV 编队中各 UAV 到达各自 e_n 点后沿直线 $|e_n f_n|$ 自右至左飞行,此时所有 UAV 虽不再同一排面进行搜索任务,但可以完全可以保证对目标区域进行全覆

盖搜索。任意相邻两架 UAV 间前后相距 $L_d = 6R_s - 2R_c$, 由于在 2) 转弯过程中第 N_n 架 UAV 飞行路径最短, 故其最先到达左边界(边 AD)后, 以最小转弯半径 R_s 进行“右转弯-直线-右转弯”飞行, 经过 $\widehat{f_{N_n}g_{N_n}} \rightarrow |g_{N_n}h_{N_n}| \rightarrow \widehat{h_{N_n}i_{N_n}}$, 其中, $|g_{N_n}h_{N_n}| = (4 \cdot N_n - 2)R_s - 2R_c$ 。同理可得, UAV_n 开始右转弯时, 位置距左边界 AD 长度为

$$r_n = (N_n - n)(R_s - R_c) \quad n = 1, 2, 3, \dots, N_n - 1 \quad (3)$$

两次转弯之间直线距离为

$$|g_n h_n| = (4 \cdot n - 2)R_s - 2R_c \quad (4)$$

所有 UAV 中 UAV₁ 最后完成右转弯, 此时, 编队中各 UAV 重新组成一排自左至右进行覆盖搜索。

4) 重复 1) ~ 3), 直到 UAV 编队完成对整个区域的覆盖搜索。

理论分析可得改进后的区域覆盖搜索算法具有以下性质。

性质 1 改进后的 UAV 编队覆盖搜索算法能够完成搜索区域的完全覆盖。

证明 由于 N_n 架 UAV 排成一排从区域左边界下侧 A 点开始起飞, 水平向右搜索, 故 UAV 转弯前后方区域已被完全搜索。转弯过程中, UAV₁ 过右侧边界后进行转弯, 故图 2 中 AB 之间 UAV₁ 搜索宽度范围内不存在未搜索区域。

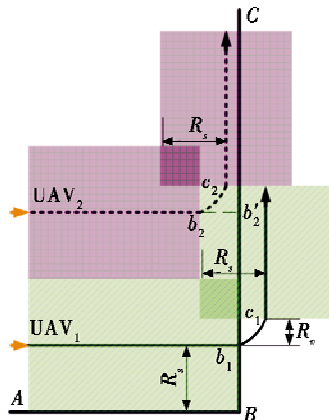


图2 UAV 转弯示意图

Fig.2 UAV search situation with turning radius constraints

由于 $|b_2 b_2'| = R_s - R_c$, 故 UAV₂ 搜索宽度范围内点 b_2 右侧区域内不存在未搜索区域。同理, 可得其他 UAV 在转弯过程中其探测宽度范围内不存在未搜索区域。

同理可得, UAV 编队到达左边界, 执行“右转弯-直行-右转弯”后, 自右向左搜索过程中所进行探测宽度内不存在未探测区域。

因此, 可得 UAV 以改进后搜索方法进行搜索时不存在遗漏的搜索区域的结论。

证毕。

性质 2 UAV 编队中所有 UAV 所经过路径长度相等, 且整体搜索路径小于传统“Z”字形搜索策略。

证明 假定 UAV 编队完成覆盖搜索时, 所有 UAV 刚好停留在 BC 边界上, 第 N_n 架 UAV 刚好与 C 点距离为 R_s 。若 UAV 编队区域内搜索方向共调整 $2k$ 次, 则计算得传统搜索方法情况下, UAV 编队中每架 UAV 所飞过的航迹长度相等, 均为

$$L_c = (2k + 1)L + 2k\pi R_c + 4kN_n R_s - 4kR_c \quad (5)$$

结合图 1, 经计算得改进后各 UAV 飞过航迹的路径长度相等, 均为 $L_c = 2(k + 1)L + 2k\pi R_s + 4kN_n R_s - 4kR_s - 2k(N_n - 1)(R_s - R_c)$, 由于 $N_n > 1, R_s > R_c$, 显然 $L_c > L_c$, 即改进后各 UAV 飞行航迹的路径长度减少。

证毕。

同样可以得出, 与采用内螺旋式方法搜索所经历搜索路径在靠近区域中心位置转弯较多, 且各 UAV 路径长短不一、相差较大的情况相比, 改进后的搜索方法不存在连续转弯的情况, 且所有 UAV 路径长度相等, 便于工程实现。

3 编队搜索队形重构

多 UAV 编队在执行搜索任务时, 由于传感器故障, 或战场环境中 UAV 被击落情况下, 剩余 UAV 要想继续很好地完成任务, 需要对搜索的编队进行调整, 图 3 所示为几种 UAV 编队队形的重构情形。

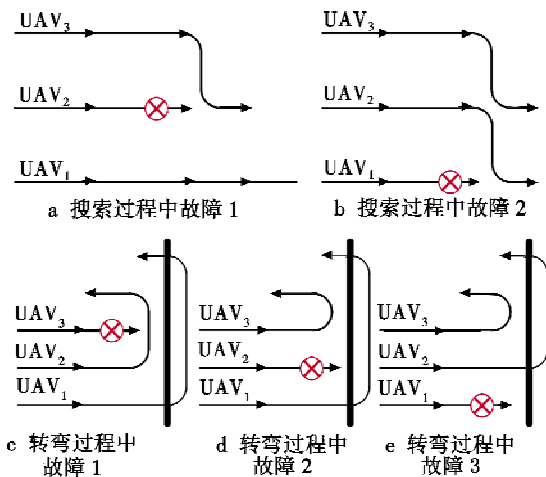


图3 UAV 编队重构示意图

Fig.3 Methods for UAV formation reconstruction

当 UAV 在自左向右搜索过程中遇到故障时, 编队重构方法如图 3a 和图 3b 所示, 为减少对目标区域漏掉的搜索范围, 编队剩余 UAV 以最小转弯半径 R_s 按“转弯-直线-转弯”方式向搜索过的区域靠拢; 当转弯过程中有 UAV 因故障无法执行搜索任务时, 则如图 3c、图 3d 和图 3e 所示。图 3c 中 UAV₃ 故障, UAV₁ 和

UAV₂ 按原路径“左转弯 - 直行”,当直行至比原定 UAV₃ 自右至左搜索高度低 R_0 时,UAV₂ 以最小转弯半径“左转弯 - 直行”,进入 UAV₃ 原计划需搜索轨道搜索,UAV₁ 按相同方法搜索 UAV₂ 原计划需搜索的区域;图 3d 中 UAV₂ 故障时,UAV₃ 需多向右飞行 $R_1 - R_0$ 的距离,其他路径基本保持不变;图 3e 中显示 UAV₁ 故障情况,此时 UAV₂ 和 UAV₃ 的调整方法与图 3d 中 UAV₃ 方法基本相同。区别在于两架 UAV 均需向右多飞行 $R_1 - R_0$ 后再进行左转弯。

经分析可得,改进后的搜索方法均可使图 3 中各种情形完成编队队形重构。显然,非编队中间 UAV 故障情况(如图 3b、图 3c、图 3e 所示)下,改进后的搜索算法和“Z”形搜索算法进行编队重构过程相差不大,然而编队中间 UAV 故障时,改进后的搜索算法具有明显的优势。如图 3a 中,队形重构后,UAV₃ 落后于 UAV₁ 的距离为 $L_{a13} = (\pi - 4)R_0 + 2R_1$,经计算可得按“Z”字形搜索方法进行转弯过程中,两架 UAV 最近距离为 $(5 - \pi)R_0$,极易发生碰撞;图 3d 中,两架 UAV 调整后 UAV₁ 落后 UAV₃ 的距离为 $2R_1$,按“Z”字形搜索方法进行搜索,则到达下一次转弯时刻,在 UAV₁ 刚好完成第一次转弯后,UAV₃ 与 UAV₁ 位置重合,两者发生碰撞。由于改进后的方法转弯轨道不同,不存在路径重合部分,故可有效避免碰撞现象发生。

此外,在 UAV 较多、且多架 UAV 发生故障时,各 UAV 间距离会逐渐增大,传统“Z”字形方法很难进行调整,而改进后的方法则可以通过调整各 UAV 的转弯轨道来缩短各 UAV 间的距离差。

4 仿真分析

为证明改进搜索算法的最优性,这里进行仿真验证。初始条件: $L \times W = 80 \text{ km} \times 60 \text{ km}$, $v_x = 0.1 \text{ km/s}$, $R_0 = 0.5 \text{ km}$, $R_1 = 2 \text{ km}$, $N_0 = 5$ 。将目标区域划分成 80×60 网格,给每个网格赋值为 1,当 UAV 搜索过该网格时,网格值变为 0,可通过分析所有网格赋值之和的降低情况来检验搜索方法的有效性。这里分别将本文所提改进后搜索方法与传统“Z”字形搜索、内螺旋式搜索方法进行对比仿真。

假定“Z”型搜索中,所有无人机按图 4 所示的搜索轨迹进行覆盖搜索,内螺旋式搜索则按“左下方 - 右下方 - 右上方 - 左上方 - 左下方”顺序进行循环。图 5 给出了 3 种不同搜索方式下,相应覆盖侦察得到的仿真结果。

从图 5 中可以看出,3 种方法均可有效完成目标区域的覆盖搜索,且 3 种方式在初始阶段效果基本相同,之所以搜索效果相差不大,主要是因 3 种方法起始

阶段搜索策略及路径基本相同,但随着搜索任务的进行,改进搜索算法的优势逐渐显现出来。从 800 s 附近开始,UAV 编队开始转弯,由于改进算法减少了转弯过程中的无效探测区域面积,故其侦察效果逐渐优于传统“Z”字形搜索和内螺旋式方法。在 1000 s 附近,因为“Z”字形搜索比内螺旋式方法提前完成转弯,传统“Z”字形搜索效果开始稍优于内螺旋式搜索。此外,遇到转弯时,总剩余搜索价值显示的降低速度明显有一个减缓过程,而改进后搜索方法的减缓速度则不太明显。

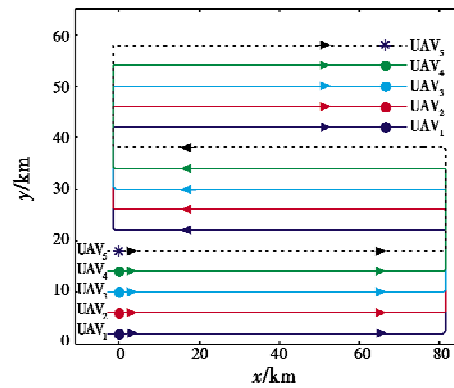


图 4 目标区域“Z”字形覆盖侦察飞行轨迹
Fig. 4 Flight path of zigzag coverage searching

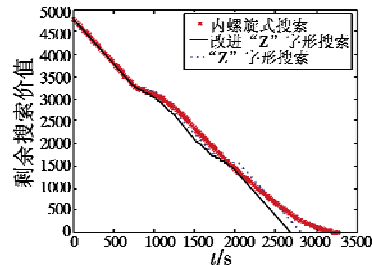


图 5 3 种搜索方式仿真结果分析
Fig. 5 Comparison of three kinds of search patterns

从仿真结果可以得出,改进的“Z”字形搜索方法用时最短,多 UAV 编队执行搜索任务的效率明显提高,所得结果与本文理论分析一致。

5 结束语

针对在环境信息完全未知情况下,对目标区域进行覆盖搜索问题,本文对传统多 UAV 协同搜索模式求解算法进行改进,并通过理论分析与仿真,验证了所提的改进方法不仅提高了整体覆盖搜索效率,而且在编队中无人机损坏的情况下,可以及时有效地进行编队重构,具有较强的实用性。下一步可以考虑本文方法与传统运动目标覆盖搜索方法相结合,以及搜索区域为非完整矩形区域环境下区域覆盖搜索等相关问题的研究。

参 考 文 献

- [1] YORK G, PACK D J. Ground target detection using cooperative unmanned aerial systems [J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2012, 65(1/4):473-478.
- [2] 田菁. 多无人机协同侦察任务规划问题建模与优化技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2007. (TIAN J. Modeling and optimization methods for multi-UAV cooperative reconnaissance mission planning problem [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.)
- [3] GUO Y, QU Z H. Coverage control for a mobile robot patrolling a dynamic and uncertain environment [C]//Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation, Hangzhou, 2004, 6:4899-4903.
- [4] VINCENT P, RUBIN I. A framework and analysis for cooperative search using UAV swarms [C]//Proceedings of the ACM Symposium on Applied Computing, Nicosia, Cyprus, 2004:79-86.
- [5] 徐文涛, 晁爱农, 叶广强, 等. 搜索打击任务的多无人机编队的研究与优化[J]. *电光与控制*, 2014, 21(4):43-47. (XU W T, CHAO A N, YE G Q, et al. On multi-UAV formation for search and strike mission [J]. *Electronics Optics & Control*, 2014, 21(4):43-47.)
- [6] 轩永波, 黄长强, 吴文超, 等. 运动目标的多无人机编队覆盖搜索决策[J]. *系统工程与电子技术*, 2013, 35(3):539-544. (XUAN Y B, HUANG C Q, WU W C, et al. Coverage search strategies for moving targets using multiple unmanned aerial vehicle teams [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(3):539-544.)
- [7] 沈东, 魏瑞轩, 祁晓明, 等. 基于 MTPM 和 DPM 的多无人机协同广域目标搜索滚动时域决策[J]. *自动化学报*, 2014, 40(7):1391-1403. (SHEN D, WEI R X, QI X M, et al. Receding horizon decision method based on MTPM and DPM for multi-UAVs cooperative large area target search [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(7):1391-1403.)
- [8] HU J W, XIE L H, XU J, et al. Multi-agent cooperative target search [J]. *Sensors*, 2014, 14(6):9408-9428.
- [9] REKLEITIS I, LEESHUE V, NEW A P, et al. Limited communication, multi-robot team based coverage [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, New Orleans, LA, USA, 2004, 4:3462-3468.
- [10] ACAR E U, CHOSET H, LEE J Y. Sensor-based coverage with extended range detectors [J]. *IEEE Transactions on Robot*, 2006, 22(1):189-198.
- [11] MAZA I, OLLERO A. Multiple UAV cooperative searching operation using polygon area decomposition and efficient coverage algorithms [C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Distributed Autonomous Robotics Systems, Toulouse, France, 2004, 221-230.
- [12] NIGAM N. The multiple unmanned air vehicle persistent surveillance problem: a review [J]. *Machines*, 2014, 2(1):13-72.

《电光与控制》再次被收录为“中国科技核心期刊”

2015年10月,经过多项学术指标综合评定及同行专家评议推荐,《电光与控制》再次被收录为“中国科技核心期刊”,并获颁了收录证书。在全国2383种中国科技核心期刊中排名第1125位。

“中国科技核心期刊”是由中国科学技术信息研究所(ISTIC)受国家科学技术部委托经过严格的定量和定性分析选取的各个学科的重要科技期刊。其目的是为我国的广大科技工作者、期刊编辑部和科研管理部门能够科学快速地评价期刊,客观准确地选择和利用期刊,为科技期刊和科研人员客观地了解自身的学术影响力,提供公正、合理、科学、客观的评价依据。

从2004年开始我刊已经连续11年被收录为“中国科技核心期刊”,加之今年获得的北京大学图书馆颁发的“中文核心期刊”和武汉大学图书馆颁发的“RCCSE中国核心学术期刊(A)”,《电光与控制》实现了三喜临门。