

基于仿真的舰载预警探测雷达使用性能分析研究

吕可, 赵严冰

(中国人民解放军 91336 部队, 河北 秦皇岛 066326)

摘要: 通过仿真手段能够对预警探测雷达在复杂环境和边界极限条件下的作战能力进行试验; 在分析雷达作战能力仿真测试方法的基础上, 从对空中目标的发现及跟踪能力、雷达边界极限能力两个方面列出仿真试验重点考核项目及具体内涵; 从探测性能、跟踪性能和抗干扰性能 3 个方面研究试验结果评估的方法内容; 最后以一个典型态势为例开展了雷达的作战能力研究; 在该态势下, 雷达抗干扰性能的自卫距离得益为 9.43%, 目标航迹连续性得益为 14.56%。

关键词: 预警探测; 仿真试验; 边界极限条件; 复杂电磁环境

Analysis and Research on Using Performance of Ship-borne Early-warning Radar Based on Simulation

LÜ Ke, ZHAO Yanbing

(Unit 91336 of PLA, Qinhuangdao 066326, China)

Abstract: The combat capability of early-warning radar in complex environment and boundary limit conditions could be tested by simulation. Based on the analysis of radar combat capability simulation test methods, the key aspects and specific connotations are listed in two aspects of the discovery and tracking capability of air target, radar boundary limit capability. The methods and contents of test results evaluation are investigated in three aspects of the detection performance, tracking performance and anti-jamming performance. Finally, a typical situation is used as an example to carry out radar combat capability study. In this situation, the self-defense distance benefit of radar anti-jamming performance is 9.43%, the target tracking continuity benefit is 14.56%.

Keywords: early-warning detection; simulation test; boundary limit conditions; complex electromagnetic environment

0 引言

舰载预警探测雷达是一种重要的警戒装备, 主要用于发现和监视海面、空中目标, 完成对海面、空中目标的搜索及多目标跟踪, 向舰作战、指挥系统发送目标的跟踪数据、航迹, 为导弹制导雷达和炮瞄雷达提供目标指示等。^[1-3]

当前国内针对预警探测雷达装备能力的外场试验是对照研制总要求, 以对具体性能指标的测试为主, 而对雷达在复杂地理、复杂气象、极限边界、高强度对抗等复杂环境和特殊条件下的作战能力的试验, 受到实际条件的限制, 测试样本量较为有限。^[4-5] 为了摸清装备性能底数和效能变化规律, 研究在复杂特殊战场环境下装备作战运用方法和应对策略, 我们可以采用计算机建模的方式, 最大限度地构造贴近实战的环境, 综合应用仿真评估等手段方法, 开展舰载预警探测雷达作战能力的分析研究, 为各级指战员合理组织运用装备、正确使用装备提供有力支撑。

1 基于仿真的雷达能力测试

利用仿真方法进行预警探测雷达作战能力测试, 首先

基于机理和数据结合的手段建立系统仿真模型, 开展数字或半实物仿真, 获得大量的仿真数据, 并利用仿真试验结果, 对要开展的外场试验方案进行辅助设计, 对雷达外场试验结果进行预测; 然后利用外场试验数据、实物测试数据等参考数据对模型进行修正, 提升仿真测试数据的准确度; 再次利用仿真方法进行边界和极限能力的评估^[6]。仿真试验及外场试验结果共同作为全面评价预警探测雷达作战能力的依据。具体实施流程如下。

2 仿真试验重点考核项目及具体内涵

利用仿真方法进行预警探测雷达作战能力试验, 核心是能够充分检验装备边界极限条件下的能力及作战效能。因此需要构建科学全面并贴近实战的战场环境, 包括各种目标、干扰及杂波环境等。随着世界信息技术和军事理论的发展, 舰载预警探测雷达也面临如隐身目标、弹道导弹、无人机群、高速高机动作战平台及各类有、无源干扰等众多新型威胁。针对这些挑战, 立足于舰载预警探测雷达的使命任务, 考虑外场开展雷达试验条件的局限性, 基于仿真的雷达作战能力试验应重点开展复杂环境下对空中目标

收稿日期: 2021-04-07; 修回日期: 2021-05-14。

作者简介: 吕可(1987-), 女, 山东菏泽人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事雷达仿真方向的研究。

引用格式: 吕可, 赵严冰. 基于仿真的舰载预警探测雷达使用性能分析研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(11): 111-115.

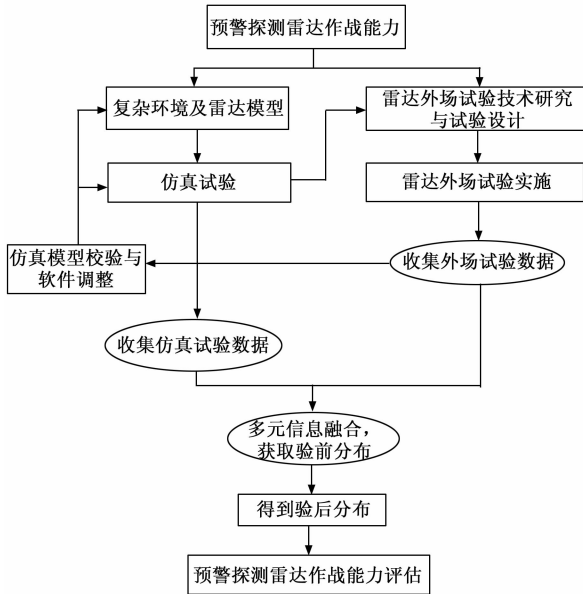


图 1 预警探测雷达性能综合试验方法

的发现及跟踪能力、雷达边界极限探测能力等项目的考核。各考核项目的具体内涵如下。

2.1 对空中目标的发现及跟踪能力

空中目标包括各类作战飞机、隐身飞机及反舰导弹等，是敌夺取空中优势、压制防空、实施全天候精确打击的主要装备，也是预警探测雷达最主要的探测目标。^[7-11]在利用外场试验结果对仿真试验系统进行一致性校对和确认后，可开展的内容包括 3 个方面。

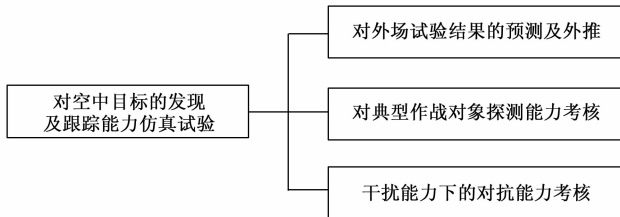


图 2 对空中目标发现及跟踪能力仿真试验开展项目

2.1.1 对外场试验结果的预测及外推

通过改变目标高度、目标反射截面积、目标数量和速度等因素，将对中高空目标的预警探测能力试验进行拓展。具体试验因素有：

2.1.2 对典型作战对象的探测能力

典型的作战对象如 F-16C/D 战隼战斗机、F-22A “猛禽”战斗机、F-35 “闪电 2” 联合打击战斗机等隐身飞机，“鱼叉”、“雄风-Ⅱ”、“雄风-Ⅲ”等反舰导弹，在对其目标特性进行建模仿真计算后，结合速度、升限、巡航高度等指标设置场景态势，考察典型作战对象在遂行典型战术动作时雷达对其发现及跟踪距离、最小作用距离、跟踪精度、反应时间等参数。

2.1.3 干扰条件下的对抗能力

重点试验对 EA-18G 电子战飞机的对抗能力。EA-

表 1 对外场试验结果外推的试验因素

序号	因素	内容
1	目标高度	将目标设定在其他不同高度,尤其是一些反舰导弹在导引头捕获目标后的末段飞行高度低至 10 m、5 m 甚至 3-1 m 等,外场用无人机无法开展此类超低高度的试验,可利用仿真进行补充测试
2	目标反射截面积	通过改变目标反射特性来体现雷达对不同类型的作战飞机、无人机及反舰导弹的探测跟踪能力
3	目标数量	在不同角度及不同高度设定多批目标,测试雷达对多目标的处理能力
4	目标运动	将飞机速度设置为亚音速或超音速,或 3~5 g 的转弯过载,考察雷达对高机动目标的跟踪精度及航迹质量
5	环境条件	改变不同的风速、风向、海情、海况、天气情况等,体现不同程度海杂波及气象杂波对雷达性能的影响

18G 电子战飞机是目前美军新型主流电子战飞机，它是在 F/A-18F 舰载多功能战斗机的基础上改进研制而成，装载了先进的电子干扰设备，可挂载高速反辐射导弹，可通过对敌实施防区外电子干扰掩护攻击飞机，保护水面舰艇、航母及地面部队免遭导弹攻击，具有防区外远距支援、随队支援、时敏打击支持以及全频谱监视功能，还能与其他战机进行高低空联合作战，共同打击敌方目标。其干扰方式有远距离支援干扰和随队干扰，干扰样式主要是压制式噪声干扰^[12]。

仿真试验可根据该型飞机的高度、速度等性能参数和典型的电子攻击作战使用方式规划作战场景，设定干扰样式、干扰参数等干扰环境，开展对典型空中平台的自卫距离试验、抗远距离支援干扰能力试验。

2.2 雷达边界极限探测能力

现代舰载雷达所面临的攻击目标具有高速、大机动、隐身、超低空、集群的特点，同时敌我之间的对抗手段不断丰富，呈现出多维一体作战行动特点。由于外场试验典型的小子样特性和不可复制性，对大扫描角、远界、高界等边界条件和多目标环境（集群）、低空突防、高速、高机动目标、隐身目标的极限能力的性能考核缺失。^[13-17]为了摸清装备“底数”，可采用仿真试验的手段，从边界探测范围和极限目标跟踪能力两个方面来考核。

2.2.1 雷达探测范围

雷达探测范围的意义涵盖距离—高度探测范围、仰角覆盖范围和方位覆盖范围。重点研究雷达探测范围的高界、低界、远界、近界以及相互组合，如探测范围高界与远界的交界域、低界与近界的交界点等。影响雷达探测范围的因素包括目标类型、发现概率、雷达视距、环境条件、对抗条件等。

表 2 雷达探测范围的试验因素

序号	因素	内容
1	目标类型	根据研制总要求,选择合适的 RCS。运动中的目标考虑加起伏模型。具有电磁计算数据的目标机型,按照相应角度的数据+起伏模型进行仿真
2	发现概率	根据研制总要求或军标相关规定,在试验结果的数据处理时选择合适的发现概率,如 50%、80%、90%或 95%
3	雷达视距	雷达视距取决于雷达天线的架高和目标的高度,主要影响雷达探测低界和远界的交界域
4	环境条件	主要指不同的风速、风向、海情情况等,会影响雷达对海面低空远界目标的探测能力
5	对抗条件	在探测范围试验中,雷达一般工作于规定的工作方式和频点。但进行高界试验时,考虑雷达主动对抗情况,可以将雷达设置一种频率捷变状态;当进行远界试验时,可设置集能工作状态等

2.2.2 目标跟踪能力

雷达在对目标的跟踪过程中,若要形成稳定的航迹,需要在数据处理时根据当前目标位置和运动参数,预测下一个时刻的目标位置,进行航迹外推和关联,从进入相关波门的多个点迹中选取正确的点迹来更新目标的航迹。因此,对于高速和高机动目标,由于其运动方向和速度多变,给雷达进行正常的航迹外推和匹配关联带来困难,容易造成目标丢失,跟踪不稳定^[18]。影响雷达对目标跟踪的极限条件有目标机动航路、机动速度、机动加速度、环境条件等。

表 3 目标跟踪能力的试验因素

序号	因素	内容
1	目标机动航路	机动航路涉及水平面固定加速度机动、水平面∞型机动航路,垂直面固定加速度机动、大角度俯冲(爬升)机动,掠海超音速机动等
2	机动速度	根据作战的运动性能,一般为亚音速或超音速
3	机动加速度	根据典型目标的实际和雷达的探测能力,最大加速度可取到 3~5 g
4	环境条件	对于低空掠海目标,考虑到海杂波对雷达信号处理的影响,需要设置典型海情条件,一般设三级

3 仿真试验结果评估

目前,预警探测雷达在外场的试验,以性能试验为主,围绕研制总要求开展单指标测试,试验结果通常是对最大作用距离、跟踪精度、分辨率等单指标进行评价,判断其是否符合相关要求。利用计算机建模与仿真技术开展的大样本、遍历条件、复杂边界条件测试,能够充分研究各个

因素对雷达性能的影响规律,暴露雷达装备问题,迭代优化抗干扰算法和措施,进而实现对被测雷达装备使用性能的一体化评估与分析。

根据具体的试验需求,通过仿真方式可开展的规律性研究很多。结合前面讨论的仿真试验的重点考核项目及具体内涵,对其结果的评估分为雷达的探测性能、跟踪性能和抗干扰性能 3 个方面。

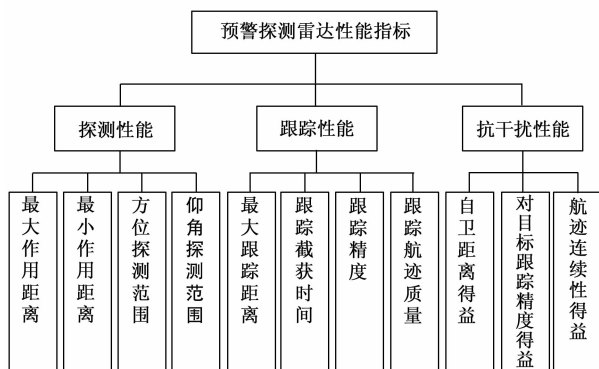


图 3 预警探测雷达性能评估指标

3.1 探测性能

雷达探测性能包括最大作用距离、最小作用距离、方位及仰角探测范围等。其中,方位及仰角探测范围主要取决于雷达天线发射波束的角度,与探测对象的关系不大。^[19]根据探测对象和环境的不同,可重点研究雷达对下述 3 种探测对象的作用距离规律如表 4 所示。

表 4 雷达对不同目标探测性能特性规律

序号	考核指标	探测对象	条件因素 1	条件因素 2
1	作用距离	空中目标	RCS 尺寸	高度
2		典型目标	姿态	高度
3		低空小目标	高度	海情海况

3.2 跟踪性能

雷达的跟踪性能是评价雷达在对目标建航跟踪以后的表现。具体指标包括对目标的最大跟踪距离、全自动或半自动模式下的跟踪截获时间,对目标距离、方位、仰角的跟踪精度、跟踪航迹质量等。其中,最大跟踪距离是指雷达采用全自动建航时,稳定建航的最远距离;跟踪截获时间是指在全自动或半自动方式下,雷达从发现第一次目标回波至目标建航的间隔时间;跟踪航迹质量指在跟踪过程中雷达航迹的中断次数。根据探测对象和环境的不同,跟踪性能主要研究以下 4 个方面的特性规律如表 5 所示。

表 5 雷达对不同目标探测性能特性规律

序号	考核指标	探测对象	条件因素 1	条件因素 2
1	最远跟踪距离	空中目标	RCS 尺寸	高度
2	跟踪截获时间	典型目标	目标数量	--
3	跟踪精度	空中目标	低界/远界	--
4	跟踪航迹质量	低空小目标	高度	海情海况

3.3 抗干扰性能

随着现代电子信息技术的发展,雷达干扰呈现出高度集成化、综合化和智能化的趋势,可以在全空域、全频域和全时域产生高强度、多样式和有针对性的电子干扰,严重影响预警探测雷达的性能。雷达抗干扰能力已经直接关系到雷达作战性能的发挥,以及在战场环境下的生存能力。

评价雷达抗干扰性能的指标很多,从技术的角度有副瓣对消的干扰抑制比、副瓣匿影的有效扇区范围、频率捷变的变频准确度、频率分集的分集带宽、集能区域的信噪比得益等。但这些技术上的评价都是针对某具体干扰场景和抗干扰方式的,不仅难以涵盖各种抗干扰措施,也不能完整描述雷达系统总体抗干扰能力,同时给试验评估带来较大的工作量。从雷达在实战环境中使用的角度看,我们更关心雷达抗干扰能力总体和全面的描述。考虑到雷达抗干扰的最终目的是提高在干扰环境下对目标的探测能力,我们从战术的角度把雷达抗有源干扰性能的评估提炼为对干扰的自卫距离得益和对目标跟踪航迹连续性得益^[20]。

3.3.1 自卫距离得益

自卫距离是指在规定的实战场景、干扰样式、干扰功率谱密度下,雷达不采取抗干扰措施时,满足规定发现概率和虚警概率时,对规定 RCS 的目标的探测距离。自卫距离得益指采取抗干扰措施后雷达自卫距离增加值相对无干扰时雷达作用距离的百分比,即采取抗干扰措施后提高的雷达作用距离百分比,定义为:

$$G_z = \frac{R_z' - R_z}{R_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, G_z 为自卫距离得益, R_z' 为受干扰后采取抗干扰措施后雷达的探测距离, R_z 为受干扰后未采取抗干扰措施时雷达的探测距离, R_0 为无干扰时雷达的作用距离。

3.3.2 目标跟踪航迹连续性得益

目标在雷达采取抗干扰措施后比采取抗干扰措施前全航程增加的有效航迹点数(距离、角度精度满足指标要求的航迹)相对于无干扰时总航迹点数的百分比,定义为:

$$G_h = \frac{N_2 - N_1}{N_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中, G_h 为目标航迹连续性得益, N_2 为有干扰采取抗干扰措施后目标全航程的有效航迹点数, N_1 为有干扰未采取抗干扰措施时目标全航程的有效航迹点数, N_0 为无干扰时目标全航程的有效航迹点数。

结合实际作战对象和作战使用,在规划了典型电子战威胁的战机性能参数和典型的电子攻击作战使用态势后,可以重点研究在不同海情海况、干扰机与攻击飞机不同相对角度条件下的自卫距离得益和目标跟踪连续性得益。

4 典型案例

下面以在电子战飞机的掩护下,战斗机进行突防为例,对预警探测雷达在此过程中的作战能力进行仿真试验评估。

战斗机飞行高度 7 000 m, 时速 700 km/h 左右, 从 300 km 飞入, 至 120 km 降高 1 000 m 继续进入至 10 km; 电子战飞机位于 250 km 处巡航, 高度 7 000 m。采用远距离支援干扰的方式, 施放压制噪声干扰, 干扰机与攻击飞机方位角度 10° , 分别记录雷达不采用抗干扰措施和采用抗干扰措施后, 发现目标距离及跟踪情况。

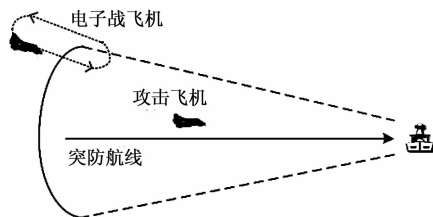


图 4 远距离支援干扰态势图

在无干扰条件下, 雷达对 7 000 m 高度目标的最大作用距离 R_0 为 297 km, 在受到干扰不采取抗干扰措施时作用距离 R_z 为 224 km, 受干扰后采取抗干扰措施后雷达的探测距离 R_z' 为 252 km, 根据公式 (1) 可以计算自卫距离得益 G_z 为 9.43%。

无干扰时目标全航程的有效航迹点数 N_0 为 158, 有干扰未采取抗干扰措施时目标全航程的有效航迹点数 N_1 为 135, 有干扰采取抗干扰措施后目标全航程的有效航迹点数 N_2 为 112, 根据公式 (2) 可以计算目标航迹连续性得益 G_h 为 14.56%。

5 结束语

通过对预警探测雷达、复杂电磁环境和典型作战对手的建模仿真, 开展基于仿真的雷达性能测试, 能够研究雷达在不同作战背景及边界极限条件下的预警探测能力, 为提出在不同战场环境中发挥最大作战效能的装备使用方案奠定基础, 为舰艇部队指挥员和一线职手正确使用装备提供指导。同时, 通过对仿真试验结果数据的分析, 可以比较全面地了解 and 掌握不同等级水平条件下目标及干扰环境对装备影响的情况, 在敏感度分析的基础上, 可选择对于装备影响较大的主要参数和典型的等级水平进行外场真实环境条件下的试验, 为外场试验方案的优化提供支撑。

参考文献:

- [1] 郭淑霞, 王亚峰, 等. 复杂电磁环境下雷达探测效能的探索性分析 [J]. 西北工业大学学报, 2015, 33 (5): 837-842.
- [2] 安红, 杨莉. 雷达电子战系统建模与仿真 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
- [3] Merrill I Skolniki. 雷达手册 (第 2 版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [4] 陈伯孝. 现代雷达系统分析与设计 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2012.
- [5] 周万幸. 雷达抗干扰效能评估模型与指标体系研究 [J]. 现代

- 雷达, 2013, 35 (11): 1-5.
- [6] Skolnik M I. Introduction to Radar System [M]. New York: McGraw-Hill, 2001.
- [7] RIHACZEK A W, HERSHKOWITZ S J. Theory and practice of radar target identification [M]. Artech House, Inc. 2000.
- [8] 李亚南, 韩壮志. 火控雷达抗欺骗干扰性能评估指标与仿真 [J]. 现代防御技术, 2015, 43 (5): 236-241.
- [9] 任明秋, 严革新. 复杂电磁环境下雷达抗干扰性能测试方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37 (6): 1277-1282.
- [10] BARTON D K. Modern Radar System Analysis [M]. Artech House, Inc. 1988.
- [11] 陈 赓, 田 波, 等. 雷达有源干扰鉴别技术综述 [J]. 现代防御技术, 2019, 47 (5): 113-119.
- [12] William Morchin. Radar Engineer's Sourcebook [M]. Artech House, Inc. 1993.
- [13] 刘江波. 雷达装备在复杂电磁环境下适应性试验研究 [J]. 舰船电子工程, 2017, 37 (3): 74-77.
- [14] 赵国庆. 雷达对抗原理 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2012.
- [15] 王雪松, 肖顺平, 冯德军, 等. 现代雷达电子战系统建模与仿真 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [16] Dave Ethington. Military Radar System Evolution Extends Service Life and Fulfills New Missions [J]. MSN, Feb. 1984: 54-64.
- [17] 赵 峰. 弹道导弹防御跟踪制导雷达探测技术研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2007.
- [18] 王索建. 基于健康管理的有源相控阵雷达威力性能评估方法 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (2): 265-268.
- [19] 符淑芹, 彭 燕, 等. 雷达装备复杂电磁环境适应性试验需求分析 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16 (5): 868-870.
- [20] 尹园威, 尚朝轩, 等. 基于故障注入的雷达装备测试性验证试验方法 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (7): 2128-2130.
- ***
(上接第 75 页)
- [9] HAMDY M, HAMDAN I. Robust fuzzy output feedback controller for affine nonlinear systems via T-S fuzzy bilinear model: CSTR benchmark [J]. Isa Transactions, 2015, 57: 85-92.
- [10] LI J M, ZHANG G, DU C X. Robust H-infinity control for a class of multiple input fuzzy bilinear system with uncertainties [J]. Control Theory & Applications, 2009: 1298-1302.
- [11] LI L, LI J, MAO C. State-Feedback Based Fuzzy Control Design for Discrete-Time Interval Type-2 Fuzzy Bilinear Delay Systems [C] // 2020 39th Chinese Control Conference (CCC). 2020.
- [12] ZOHRA Kardous, NACEUR Benhadj Braiek. Stabilizing multimodel sliding mode control for homogeneous TS-bilinear systems [J]. Journal of the Franklin Institute, 2015, 352 (1): 177-188.
- [13] CHANG W J, HSU F L, KU C C. Complex performance control using sliding mode fuzzy approach for discrete-time nonlinear systems via T-S fuzzy model with bilinear consequent part [J]. International Journal of Control Automation and Systems, 2017, 15 (4): 1901-1915.
- [14] SANCHEZ T, POLYAKOV A, RICHARD J P, et al. A robust Sliding Mode Controller for a class of bilinear delayed systems [C] // 2018 15th International Workshop on Variable Structure Systems (VSS). 2018.
- [15] LUKASIEWYCZ, MARTIN, CHAKRABORTY, et al. Generalized Asynchronous Time-Triggered Scheduling for FlexRay [C] // IEEE Transactions on Computer Aided Design of Integrated Circuits & Systems A Publication of the IEEE Circuits & Systems Society, 2017.
- [16] TABUADA P. Event-Triggered Real-Time Scheduling of Stabilizing Control Tasks [C] // IEEE Transactions on Automatic Control, 2007, 52 (9): 1680-1685.
- [17] PRADEEP C, CAO Y, MURUGESU R, et al. An event-triggered synchronization of semi-Markov jump neural networks with time-varying delays based on generalized free-weighting-matrix approach [J]. Mathematics & Computers in Simulation, 2019: 41-56.
- [18] TAN X, CAO J, LI X. Event-based impulsive control for nonlinear systems and its application to synchronization of Chua's circuit [J]. IMA Journal of Mathematical Control and Information, 2018: 82-104.
- [19] CAO Y, ZHANG L, LI C, et al. Observer-Based Consensus Tracking of Nonlinear Agents in Hybrid Varying Directed Topology [C] // IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, 47 (8): 2212-2222.
- [20] CHU X A, MU G. H-infinity observer-based event-triggered sliding mode control for a class of discrete-time nonlinear networked systems with quantizations [J]. ISA Transactions, 2018, 79: 13-26.
- [21] YAO D, LI H, LU R, et al. Distributed Sliding-Mode Tracking Control of Second-Order Nonlinear Multiagent Systems: An Event-Triggered Approach [C] // IEEE Transactions on Cybernetics, 2020 (99): 1-11.
- [22] WEN S, HUANG T, YU X, et al. Aperiodic Sampled-Data Sliding-Mode Control of Fuzzy Systems With Communication Delays Via the Event-Triggered Method [C] // IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2015, 24 (5): 1048-1057.
- [23] Naizheng S, Junmin L, Lunle Y. Adaptive fuzzy control of nonlinear systems based on multiple inputs T-S fuzzy bilinear model [C] // Control Conference (CCC), 2012 31st Chinese. IEEE, 2012: 3449-3454.