

基于破损指数法的水泥道面预养护最佳时机决策模型

龙小勇¹, 蔡良才¹, 张罗利²

(1. 空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038; 2. 空军后勤部, 北京, 100010)

摘要 为了合理确定军用机场水泥道面预养护最佳时机,在分析现有公路路面和机场道面性能模型的基础上,建立了军用机场道面破损指数与国际平整度指数之间的关系式,结合军用机场水泥道面破损指数衰变模型和破损指数-国际平整度关系式,得到了军用机场水泥道面预养护最佳时机决策模型。基于目前我军仍然主要采用三米直尺进行平整度测试的现状,在大量实测数据的基础上建立了三米直尺平均间隙与国际平整度指数相关关系式,实现了二者之间的转换。基于军用机场水泥道面性能检测数据积累较少的现状,采用空间代时间的方法,对我军使用环境相近的若干个水泥道面的破损状况和平整度数据进行了拟合分析,验证了预养护最佳时机决策模型的正确性,得出了模型的具体参数。通过对破损指数-国际平整度关系式进行二次求导寻找道面破损指数衰变最快的唯一临界值,再由破损指数衰变模型求出该值所对应的使用年限,即为最佳预养护最佳时机。

关键词 水泥混凝土道面;预防性养护;最佳养护时机;决策模型;道面破损指数;国际平整度指数

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.03.006

中图分类号 V35;U418.6 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)03-0033-05

Decision Model of Preventive Maintenance Time for Cement Concrete Pavement of Military Airport Based on Damage Index Method

LONG Xiaoyong¹, CAI Liangcai¹, ZHANG Luoli²

(1. Aeronautics and Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. Air Force Logistics Department, Beijing 100010, China)

Abstract: In order to reasonably determine the best time for preventive maintenance of cement concrete pavement at military airports, the relationship between the pavement damage index and IRI is established on the basis of the analysis of the existing highway and airport pavement performance model. The decision model of preventive maintenance time for cement concrete pavement of military airport is obtained, combined with the pavement damage index decay model and the damage index-IRI relationship. Based on the current situation that our army still mainly uses the three-meter ruler to test the roughness and a large amount of measured data, the correlation between the IRI and the average clearance of the three-meter ruler is established. Based on the fact that the performance data of cement concrete pavement in military airport accumulate less, the damage status and flatness data several airport cement concrete pavements with simi-

收稿日期: 2018-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(51578540)

作者简介: 龙小勇(1990—),男,湖南耒阳人,博士生,主要从事机场规划设计与管理研究。E-mail: 18509270709@163.com

引用格式: 龙小勇, 蔡良才, 张罗利. 基于破损指数法的水泥道面预养护最佳时机决策模型[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(3): 33-37. LONG Xiaoyong, CAI Liangcai, ZHANG Luoli. Decision Model of Preventive Maintenance Time for Cement Concrete Pavement of Military Airport Based on Damage Index Method[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(3): 33-37.

lar service environment to our army fitted and analyzed using the method of space generation time. The correctness of the preventive maintenance timing model has been verified, and the specific parameters of the model have been obtained. It can be found that the fasted decay threshold of the damage index, unique to that exists, by the damage index-IRI relationship. Then the damage-decay model is used to find out the useful life of this value, which is the best preventive effect maintenance time.

Key words: cement concrete pavement; preventive maintenance; optimal timing of maintenance; decision model; pavement damage index; IRI

预防性养护是指在道(路)面状况良好、不影响道(路)面结构承载力的前提下,对现有道(路)面系统合理地、有计划地采取相对应的养护措施,以达到延缓道(路)面性能的衰减、保持或改善道(路)面功能状况、保持整个寿命周期内具有较高效益费用比、推迟后期大修或重建时间的目的,是一种科学的、高效的养护理念^[1]。预防性养护作为一种全新的养护理念,已经得到了广泛关注,并且在公路沥青路面养护中得到了应用,取得了一定的实际效果。然而我军机场道面养护工作仍然处于“即坏即修,不坏不修”的阶段,大修或重建时间通常提前到来,无法实现效益-费用比的最大化,甚至严重浪费了资源。因此,开展军用机场水泥道面预防性养护研究,促进预防性养护理念在我军道面养护中推广应用具有重大现实意义。预防性养护的效果主要取决于预养护介入的时机及其措施,只有在最佳的时间段内采取相应的预养护措施,才能保证道面在寿命周期内具有良好的使用性能和最佳的效费比,过早或者过晚地进行预养护都不能达到最佳的养护效果。因此,确定军用机场水泥道面预养护最佳时机是预防性养护研究的关键问题。

国内外在预养护最佳时机领域的研究主要集中在沥青路面,并取得了一定的研究成果^[2-13]。但是,由于水泥混凝土道(路)面为刚性铺面,其抗弯拉强度低而抗压强度较高,板与板之间存在接缝使得其连续性和整体性不如沥青道(路)面。因此,水泥混凝土道(路)面的病害特征及其衰变发展规律不同于沥青混凝土道(路)面,两者确定预养护最佳时机的模型和方法也不相同,不能完全照搬沥青路面预养护最佳时机的研究成果,必须结合水泥混凝土道(路)面的特点开展与其相适应的预养护最佳时机研究,至今该方面的研究相对较少。国内外部分学者基于水泥混凝土道(路)面的特点,对水泥混凝土道(路)面预养护最佳时机确定方法进行了积极的探索^[14-22],为本文军用机场水泥道面预养护最佳时机研究提供了坚实的基础。

纵观国内外有关预养护最佳时机的研究成果,其建模方法主要有以下2类:①从性能技术指标角

度有破损指数法、路面状况指数法、行驶质量指数法、决策树或决策矩阵法、基于时间或路况的方法等;②从经济分析角度有效益费用评估法、重构优化DEA模型法、生命费用周期评估法和排序法等。通过对我军大部分机场道面性能检测数据进行分析,发现道面表面破损情况与道面平整度之间存在着一定的联系,即使新建水泥混凝土道面也不是绝对平整的,当飞机滑过道面不平整部位时,会产生竖向的振动荷载,加速道面的损坏;而当道面损坏后,平整度也随之衰减。随着机场道面平整度不断衰变,由于不平整所引起的竖向附加动荷载不断加大,使道面破损状况不断变差,当平整度衰减到一定程度时,竖向附加动荷载急剧增加,造成道面破损状况急剧变坏。因此本文拟采用破损指数法,通过确定道面破损指数和平整度之间的关系,再结合道面破损指数衰变模型得到军用机场水泥道面预养护的最佳时机。

1 水泥道面预养护最佳时机决策模型的建立

1.1 基本假设

水泥混凝土道面越不平整,则道面动态荷载越大;而道面动态荷载越大,则道面损坏速率越快。道面的不平整程度与道面损坏速率相互促进,形成一个恶性循环的过程^[17]。基于以上分析,可以提出如下假设:

随着道面不平整程度的不断增加,动态荷载会加剧道面损坏,在平整度的衰变过程中存在一个临界值,当平整度大于该临界值时,动态荷载显著增大,道面加速损坏。道面处于该临界值时,并非道面损坏程度最严重之时,却是道面损坏发展的加速度最大之时。如果在临界值附近采取相应的预养护措施,就可以最有效地减缓道面使用性能的衰减^[17]。

1.2 模型建立

基于水泥混凝土道面衰变过程中平整度-动态荷载相互作用的基本假设,可以根据特定地区水泥混凝土道面损坏状况与平整度的关系,求得道

面衰变过程中加速度最大时所对应的平整度临界值,进而得到道面预养护最佳时机。模型构建过程如下:

1)首先,对某个地区道面破损指数 L 和国际平整度指数 IRI(本文中简记为 I)进行调查和检测,通过回归分析得到道面破损指数与国际平整度指数的函数关系:

$$L = f(I) \quad (1)$$

2)求出式(1)的二阶导数:

$$L'' = f''(I) \quad (2)$$

3)求出式(2)的最大值:

$$|\max(f''(I))| \quad (3)$$

4)求出道面衰变加速度最大值时所对应的平整度临界值:

$$I_0 = f^{-1}(\max(f''(I))) \quad (4)$$

目前,国内外关于路面性能模型的研究较多,而对道面性能模型的研究则相对较少,本文对现有道面性能模型进行分析,选取参考文献[23]所建立的道(路)面状况指数 PCI 与国际平整度指数之间的关系形式作为本文所建模型的参考蓝本^[23],建立机场道面破损指数 L 与国际平整度指数之间的关系见式(5):

$$L = 100\{1 - \exp[-(a/I)^b]\} \quad (5)$$

由于目前我军所采用三米直尺平均间隙和邻板差表征道面平整度难以从整体上量化反映平整度状况,且其与破损指数之间的拟合关系难以建立。因此,本文选用国际平整度指数来描述道面平整度状况。

结合我军破损指数衰变模型,得到道面破损最快时,所对应的使用年限,即为军用机场预养护最佳时机。

2 水泥道面预养护最佳时机决策模型的验证

2.1 三米直尺平均间隙与国际平整度指数的相关性分析

基于目前我军仍然主要采用三米直尺进行平整度测试的现状,而本文拟采用国际平整度指数来描述道面平整状况,因此为便于建立道面破损指数与平整度之间的拟合关系,对我军 4 个同类型机场道面采用三米直尺进行平整度测试,通过对所得数据进行分析(见图 1),得出三米直尺平均间隙与国际平整度指数的相关关系式(6):

$$I = 1.3402S + 0.89909 \quad (6)$$

式中: S 表示三米直尺平均间隙,单位为 mm。

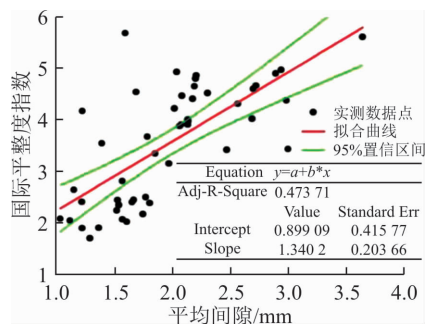


图 1 三米直尺平均间隙与国际平整度指数之间的关系

2.2 模型参数拟合

要建立适合我军机场道面现状的道面破损指数与国际平整度指数之间的关系,最好能获得道面长期性能的数据,但由于我军机场道面性能检测历史数据较少,且数据的时间序列不长。为解决我军机场道面使用性能“贫数据”的问题,我们引入时间-空间转换法(用空间代替时间),把同一类型的机场道面在不同寿命时间点的道面性能状况(空间分布)当作同一道面在不同寿命时间点的表现(时间变化),以延长数据的时间序列。应用这种方法,对我军使用环境相近的若干个机场道面使用性能数据进行了分析,如图 2 所示。得出了适合我军机场道面特性的国际平整度指数-破损指数关系式(7)。

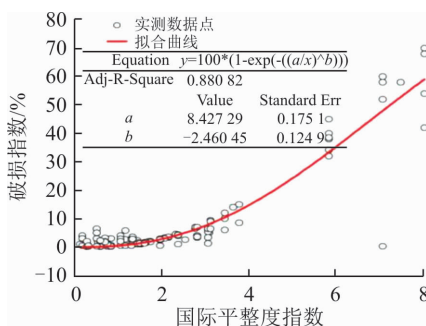


图 2 IRI 与 L 之间的关系

$$L = 100\{1 - \exp[-(8.42729/I)^{-2.46045}]\} \quad (7)$$

拟合度 $R^2 = 0.88082$

2.3 确定水泥道面预养护最佳时机

从图 2 可以看出,当机场道面国际平整度指数增大时,道面破损状况指数也随之增大,其变化速率逐渐增大,当国际平整度指数增大到某一特定值时其变化速率显著增大。因此,可以认为这一特定值即为国际平整度指数的临界值,此时的道面破损指数的加速度达到最大值,即道面急速破坏。

为求得当道面损坏快速加重所对应的国际平整度指数,需求式(5)的二阶导数,其二阶导数取最大值时所对应的值即为平整度临界值,同时也是道面最佳养护时机^[16]。

求式(5)的二阶导数:

$$L' = -100a^b \exp(-(a/I)^b) I^{-b-1} \quad (8)$$

$$L'' = -100a^b \exp(-(a/I)^b) \quad (9)$$

$$[a^b b I^{-2b-2} - (b+1) I^{-b-2}]$$

式中: L'' 即为道面破损指数 L 的加速度;当 L'' 取最大值时;其所对应的 I 即为国际平整度指数的临界值。

将 $a=8.42729, b=-2.46045$ 代入式(9)得到 L 的二阶导数与IRI之间的关系如图3所示。

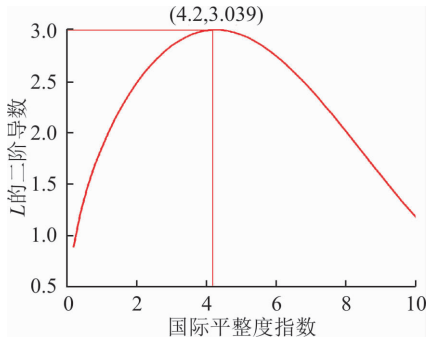


图3 L 二阶导数与IRI之间的关系

从图3中可以看出, L -IRI函数的二阶导数存在某个最大值点,当IRI达到该值时,道面表面损伤指数 L 会加速衰减,从图3可知,当 L 加速发展时对应的IRI为4.2,通过式(7)可知,此时对应的 L 值为16.49,道面破损加速度达到最大值。

参考文献[24]对我军水泥混凝土道面破损指数进行预测,得到图4破损指数衰变模型^[24]。

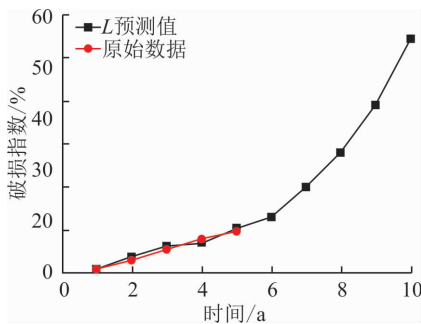


图4 道面破损指数衰变曲线

$$L = 1.1993e^{0.3986N} \quad (10)$$

$$\text{拟合度 } R^2 = 0.9153$$

将 $L=16.49$ 代入式(10),得到道面破损加速度最大时所对应的年份为 $N=6.6$ a,即为军用机场水泥道面预养护最佳时机。

3 结论

1)在分析现有路面性能模型和道面性能模型的基础上,选取参考文献[23]所建立的道(路)面状况指数与国际平整度指数之间的关系形式作为本文所

建模型的参考蓝本,建立了军用机场道面破损指数与国际平整度指数之间的关系式,结合军用机场水泥道面破损指数衰变模型,得到了军用机场水泥道面预养护最佳时机决策模型。

2)基于当前我军仍然主要采用三米直尺进行平整度测试的现状,在大量实测数据的基础上建立了三米直尺平均间隙与国际平整度指数相关关系式,实现了二者之间的转换。基于军用机场水泥道面性能检测数据积累较少的现状,采用空间代时间的方法,对我军使用环境相近的若干个水泥道面的破损状况和平整度数据进行了拟合分析,验证了预养护最佳时机决策模型的正确性,得出了模型的具体参数。通过破损指数-国际平整度关系式,求导寻找道面破损指数衰变最快的临界值,该值唯一存在,再由破损指数衰变模型求出该值所对应的使用年限,即为最佳预养护最佳时机。

3)采用回归拟合的方法建立的模型具有地域局限性,具体参数随着所研究地区的不同有所差异。本文所建立的预养护最佳时机决策模型也是因地制宜,仅供参考,在实际应用时,需根据不同地区的特点作出相应调整。

参考文献(References):

- [1] Federal Highway Administration. Insights Into Pavement Preservation [R]. Washington D C: Federal Highway Administration, 2003;9-11.
- [2] PESHKIN D G, HOERNER T E, ZIMMERMAN K A. Optimal Timing of Pavement Preventive Maintenance Treatment Applications[M]. Washington D C: Transportation Research Board, 2004.
- [3] THOMAS J W, MARK W, ROGER C O, et al. Preventive Maintenance Best Management Practices of Hot Mix Asphalt Pavements[R]. St Paul: Minnesota Department of Transportation, 2009.
- [4] HAIDERS W, DWAIKAT M B. Estimating Optimum Timing for Preventive Maintenance Treatment to Mitigate Pavement Roughness[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2011, 2235(1): 43-53.
- [5] BEIN P. Uncertainty, Time, and Risk in the Optimization of Maintenance and Rehabilitation of Pavements [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1984, 11(2): 308-323.
- [6] LI H M, NI F J. Investigation into Application Time of Highway Asphalt Pavement Preventive Maintenance Treatments[C]//15th Cota International Conference of Transportation Professionals. Beijing, China: [s. n.], 2015: 938-948.
- [7] ANDERSON R M, BLANKENSHIP P B, KING G

- N. Using Asphalt Binder Properties as an Indicator of Oxidative Aging and the Proper Timing of Preventive Maintenance for Asphalt Pavement [Z]. Canadian Technical Asphalt Association, 2015.
- [8] 姚玉玲,李学红,张毕超,等. 沥青路面预养护最佳时机综合评价指标体系[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(5): 48-53.
YAO Y L, LI X H, ZHANG B C, et al. Integrative Evaluation Index System for Preventive Maintenance Timing of Asphalt Pavement[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(5): 48-53. (in Chinese)
- [9] 王笑风. 沥青路面最佳预防性养护时机决策模型[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2011, 31(3): 7-12.
WANG X F. Model to Decide Optimal Timing of Asphalt Pavement Preventive Maintenance[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2011, 31(3): 7-12. (in Chinese)
- [10] 党永明. 沧州市沥青路面预防性养护时机与对策优化研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2014.
DANG Y M. Research on Timing of Asphalt Pavement Preventive Maintenance and Optimal Treatment in the City of Cangzhou[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [11] 林俊涛,吴少鹏,刘全涛,等. 沥青路面功能性预养护材料的养护时机研究[J]. 中国公路学报, 2014, 27(9): 19-24.
LIN J T, WU S P, LIU Q T, et al. Research on Maintenance Time for Functional Preventive Materials in Asphalt Pavement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(9): 19-24. (in Chinese)
- [12] 许德录. 沥青路面预养护最佳时机的确定方法研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2015 (11): 63-66.
XU D L. Study on Determining Timing of Preventive Maintenance of Asphalt Pavement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development(Application Technical Edition), 2015 (11): 63-66. (in Chinese)
- [13] 刘丹. 基于时段的沥青路面预防性养护时机与对策[J]. 交通世界, 2017 (23): 66-67.
LIU D. Timing and Decision of Preventive Maintenance of Asphalt Pavement Based on Time [J]. Transpoworld, 2017 (23): 66-67. (in Chinese)
- [14] 凌建明,官盛飞,张昌尧. 水泥混凝土路面预防性养护技术研究[J]. 中国市政工程, 2008(2): 77-80.
LING J M, GUAN S F, ZHANG C Y. Studies on Precuring of Cement Concrete Pavements[J]. China Municipal Engineering, 2008(2): 77-80. (in Chinese)
- [15] LAMPTEY G, LABI S, LI Z Z. Decision Support for Optimal Scheduling of Highway Pavement Preventive Maintenance within Resurfacing Cycle [J]. Decision Support Systems, 2008, 46(1): 376-387.
- [16] 彭海林. 基于水泥混凝土路面使用性能指标的预防性养护时机研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.
PENG H L. Optimal Timing of Preventive Maintenance Action Based on Performance Index Model for Rigid Pavements [D]. Changsha: Hunan University, 2008. (in Chinese)
- [17] 吴锡蛟,周文献. 基于平整度的水泥混凝土路面预防性养护时机确定方法[J]. 上海公路, 2009(2): 16-18.
WU X J, ZHOU W X. Preventive Maintenance Timing of PCC Pavement Based on PCI-IRI Model[J]. Shanghai Highways, 2009(2): 16-18. (in Chinese)
- [18] 高昌,张晨. 水泥混凝土路面预养护时机选择和效果分析[J]. 湖南交通科技, 2010, 36(2): 42-44.
GAO C, ZHANG C. Preventive Maintenance Timing and Effect Analysis of Cement Concrete Pavement[J]. Hunan Communication Science and Technology, 2010, 36(2): 42-44. (in Chinese)
- [19] TYLER A D, CHRISTOPHER M D, BALADI G Y, et al. Selection of Optimum Pavement Treatment Type and Timing at the Project Level [Z]. Transportation Research Board Meeting, 2011.
- [20] 田建文,钱璞. 高速公路水泥混凝土路面预防性养护应用技术研究[J]. 交通标准化, 2012, 40(3): 97-99.
TIAN J W, QIAN P. Application Technology of Preventive Maintenance for Expressway Concrete Pavement[J]. Communications Standardization, 2012, 40(3): 97-99. (in Chinese)
- [21] 刘玉磊. 水泥路面预防性养护最佳时机确定的研究[J]. 黑龙江交通科技, 2015, 38(1): 105.
LIU Y L. Study on the Optimal Timing of Preventive Maintenance of Cement Pavement[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2015, 38(1): 105. (in Chinese)
- [22] CHATTI K, LEE D, BALADI G Y. Development of Roughness Thresholds for the Preventive Maintenance Based on Dynamic Loading Considerations and Dam Age Analysis[Z]. UMINUMBER, 3021803.
- [23] 周文献. 在最适当的时机养护水泥路[J]. 中国公路, 2007(12): 84-85.
ZHOU W X. At the Most Appropriate Time to Maintain the Cement Pavement[J]. China Highway, 2007 (12): 84-85. (in Chinese)
- [24] 张罗利. 军用机场道面养护决策技术体系研究[D]. 西安: 空军工程大学, 2012.
ZHANG L L. Research on Military Airport Pavement Maintenance Decision Technology System[D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2012. (in Chinese)

有人/无人机协同作战系统 C2 结构和 行动计划适应性设计方法

钟 贇¹, 姚佩阳¹, 张杰勇¹, 熊焯明², 吴吉祥³

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077; 2. 西安电子科技大学计划财务处, 西安, 710126;
3. 空军通信士官学校, 辽宁大连, 116600)

摘要 针对有人/无人机协同作战系统指挥控制(C2)结构和行动计划设计问题,基于粒度计算思想,提出分层适应性设计方法。将C2结构和行动计划适应性设计问题分解为平台编组方案生成、任务调度方案生成、平台编组方案调整和任务调度方案调整4个子问题,从而有效降低问题求解规模。首先,建立适应性设计框架;其次,对关键元素属性进行形式化描述;然后,详细分析子问题耦合关系;最后,给出了4个子问题的适应性设计方法。

关键词 有人/无人机;指挥控制结构;行动计划;粒度计算;适应性设计

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.03.007

中图分类号 E917 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)03-0038-08

An Adaptive Design Method for C2 Structure and Action Plan in MAV/UAV Cooperative Engagement System

ZHONG Yun¹, YAO Peiyang¹, ZHANG Jieyong¹, XIONG Yeming², WU Jixiang³

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;
2. Financial Department, Xidian University, Xi'an 710126, China;
3. Air Force Communication Sergeant School, Dalian 116600, Liaoning, China)

Abstract: In view of the designing method for C2 structure and action plan in manned/unmanned aerial vehicle (MAV/UAV) cooperative engagement system based on the granular computation theory, a hierarchical adaptive design method is proposed. The plan is classified into four smaller sub-problems, i. e., platform marshalling scheme generation, task schedule scheme generation, platform marshalling scheme adjustment, and task schedule scheme adjustment, reducing the problem solving scale by so doing. Firstly, an adaptive design framework is established, and a formalized description to key element attributes is given. Secondly, the coupling relationship of sub-problems is analyzed in detail, and lastly, the corresponding adaptive design methods for four sub-problems are presented.

Key words: manned/unmanned aerial vehicle (MAV/UAV); command and control (C2) structure; action plan; granular computation; adaptive design method

收稿日期: 2018-05-30

基金项目: 国家自然科学基金(61573017);空军工程大学信息与导航学院博士生创新基金(KGD08101604)

作者简介: 钟 贇(1990—),男,江苏金坛人,博士生,主要从事有人/无人机协同作战研究。E-mail:718227697@qq.com

引用格式: 钟贇,姚佩阳,张杰勇,等. 有人/无人机协同作战系统 C2 结构和行动计划适应性设计方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(3): 38-45. ZHONG Yun, YAO Peiyang, ZHANG Jieyong, et al. An Adaptive Design Method for C2 Structure and Action Plan in MAV/UAV Cooperative Engagement System[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(3): 38-45.