

引用格式:刘日,刘永波,徐明,等.运输机重装空投模型及控制若干问题综述[J].电光与控制,2018,25(11):62-66,72. LIU R, LIU Y B, XU M, et al. Heavyweight airdrop of transport aircraft: models and control problems[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(11):62-66, 72.

## 运输机重装空投模型及控制若干问题综述

刘日<sup>1</sup>, 刘永波<sup>1</sup>, 徐明<sup>1</sup>, 毛瑜昊<sup>2</sup>, 姜巍<sup>1</sup>

(1. 空军哈尔滨飞行学院理论训练系, 哈尔滨 150000; 2. 空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038)

**摘要:** 运输机重装空投是一项前沿和尖端的军事技术,近年来已成为学术界竞相研究的热点。对重装空投过程的动力学模型和飞行控制方法研究现状进行了综述,分析了整体法建模及分离体法建模的优缺点和适用性,研究了线性控制、动态逆控制、滑模变结构控制、反步控制以及模型参考自适应控制等先进控制方法在重装空投控制器设计中的应用情况,讨论了当前重装空投控制器设计中存在的问题与挑战,为下一步的研究提供帮助和借鉴。

**关键词:** 重装空投; 动力学模型; 飞行控制; 运输机

中图分类号: V249 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.11.012

## Heavyweight Airdrop of Transport Aircraft: Models and Control Problems

LIU Ri<sup>1</sup>, LIU Yong-bo<sup>1</sup>, XU Ming<sup>1</sup>, MAO Yu-hao<sup>2</sup>, JIANG Wei<sup>1</sup>

(1. Theory Training Department, Harbin Air Force Flight Academy, Harbin 150000, China;

2. Institute of Aeronautic and Astronautic Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** Heavyweight airdrop of the transport aircraft is an advanced and sophisticated military technology, which has become a research hotspot in the academic field. The research status of the dynamic models and flight control approaches in heavyweight airdrop operations are reviewed in this paper. The advantages, disadvantages as well as the applicability of the integrated modeling method and the separated modeling method are analyzed. The application of such advanced control methods as linear control, dynamic inversion control, sliding mode variable structure control, Backstepping control and model reference adaptive control in the design of heavyweight airdrop controller are studied. The existing problems and challenges in the design of heavyweight airdrop controller are discussed, which is helpful for further research.

**Key words:** heavyweight airdrop; dynamic model; flight control; transport aircraft

### 0 引言

重装空投是利用大型运输机将重型武器装备、军用补给及救灾物资投放至地面目标区域的技术,其特点是重型货物在机舱内的持续移动及瞬间出舱会对飞机产生大幅的干扰,使其飞行状态出现大幅的、突然的变化<sup>[1]</sup>。高度和姿态不稳会导致货物着陆点偏离目标区域,降低任务性能,特别是低空空投时,若发生高度下降的情况,将存在飞机触地风险。空速损失和迎角

增大可能诱发飞机失速,威胁飞行安全。围绕重装空投关键技术进行深入研究对提高飞机空投能力,保证安全性具有重要意义。国外重装空投技术虽然早已从理论研究走向实装,然而出于保密和技术封锁的缘故,有关重装空投基础理论研究的公开报道并不多见,可查阅的文献主要集中于重装空投飞行员模拟训练系统开发<sup>[2]</sup>以及针对特定机型的重装空投试飞试验报告<sup>[3-4]</sup>。国内对重装空投基础理论的研究始于20世纪80年代初<sup>[5-6]</sup>,在此后的三十多年里,众多学者在系统动力学建模<sup>[7-23]</sup>和飞行控制方法研究<sup>[24-34]</sup>等方面取得了一大批创新性成果。

本文对重装空投过程动力学建模和飞行控制方法研究现状进行了综述,研究了已有模型和控制方法的优缺点与应用条件,系统分析了重装空投飞行控制器

收稿日期:2017-12-11

修回日期:2017-12-24

基金项目:国家自然科学基金(61273141);航空科学基金(20141396012)

作者简介:刘日(1988—),男,吉林长春人,博士,助教,研究方向为空中指挥引导和飞行控制。

设计面临的问题与挑战。

## 1 重装空投过程模型研究

### 1.1 整体法建模

国内胡兆丰和肖业伦于 1980 年撰写了基于整体法研究货物在舱内移动时飞机动力学模型的报告<sup>[5-6]</sup>,并采用数值计算和模拟试验分析了运-8 飞机投放重型货物时的动力学特性<sup>[5]</sup>,初步奠定了整体法建模的基础;张晶等<sup>[7]</sup>应用整体法建模思想研究了飞机燃油消耗和传输、武器发射、起落架收放以及设备移动等条件下的飞机动力学建模问题,拓展了整体法建模的应用。由于不需要考虑飞机和货物间的相互作用力,因此整体法建模的显著特点是避免了复杂的受力分析,但需要实时计算整体重心、转动惯量和惯性积,且由整体法得到的系统状态变量具有整体特性,需要进一步转换成飞机运动状态,不便于由单件货物空投模型拓展到多件货物连续空投模型。另一方面,整体法建模普遍假设货物沿机舱导轨做匀加速运动<sup>[5-7]</sup>,这显然与实际系统存在偏差。韩艳铎等<sup>[8-10]</sup>放宽了对货物运动规律的苛刻假设,采用拉格朗日分析力学的第二类方程,推导了重装空投过程“飞机-货物”耦合动力学方程,相比牛顿矢量力学方法,其建模过程更加简洁,但仍存在模型可拓展性不好的问题。

### 1.2 分离体法建模

赖志红<sup>[11-12]</sup>是国内较早采用分离体法建立重装空投过程飞机动力学模型的学者之一,并基于分离体模型研究了空投模拟试验方法<sup>[12]</sup>;傅百先<sup>[13]</sup>在文献<sup>[11]</sup>的基础上,提出利用分离体方法解决多件货物连续空投过程的数学建模问题,研究了连续空投时飞机瞬时重心的计算方法;欧阳绍修等<sup>[14]</sup>基于分离体法推导了飞机和货物的动力学方程,并详细讨论了牵引伞的牵引力和货物对飞机约束反力的确定方法;孙宝亭<sup>[15]</sup>假设空投过程飞机运动状态变化不大,将货物对飞机的干扰力和干扰力矩直接耦合到飞机小扰动运动方程中。文献<sup>[11-15]</sup>的研究成果基本形成了重装空投过程分离体法建模的理论框架,后来的研究都是在其基础上发展的,且主要的发展方向是放宽建模假设条件,而考虑更多的实际因素。冯艳丽等<sup>[16]</sup>在建模过程中考虑了飞机的横侧向运动;杨雨等<sup>[17-18]</sup>建模时将货物滑动速度和位置作为系统状态变量,使得模型更加精确;李大东等<sup>[19]</sup>考虑了货物尺寸、货物对飞机约束反力的作用点位置以及舱内导轨倾斜角等多种因素。此外,还有文献基于拉格朗日第二类方程<sup>[20]</sup>,分别建立空投过程中飞机和货物的动力学模型。国外也有少量公开文献报道了基于分离体方法的重装空投模

型研究,如文献<sup>[2]</sup>和文献<sup>[21-23]</sup>,其研究主要侧重于分析货物的运动规律。

总的来看,学术界对重装空投过程动力学建模问题已进行了比较广泛的研究,整体法与分离体法的建模理论基本形成体系,但是在“贴近实际”方面仍然需要进一步完善,比如鲜有文献在模型中考虑货物装载不对称、滑轨与飞机纵轴不重合等问题。

## 2 重装空投过程飞行控制方法研究

### 2.1 基于小扰动模型的线性控制方法

韩艳铎等<sup>[8]</sup>提出在货物尚未解锁时对飞机纵向运动方程进行小扰动线性化,将货物沿机舱导轨滑动对飞机产生的干扰简化为线性方程中的附加俯仰角速率,在此基础上设计了基于  $H_{\infty}$  鲁棒控制理论的运输机低空重装空投过程飞行控制器;冯艳丽等<sup>[16]</sup>提出对重装空投全过程进行逐点小扰动线性化的思想,从而将非线性系统的控制问题转化为线性区间系统的控制问题,然后基于区间鲁棒控制理论设计飞行控制律;杨晓科等<sup>[24-25]</sup>设计了重装空投过程的干扰观测补偿控制器,该方法利用比例积分观测器实时观测飞机重心变化引起的干扰力和干扰力矩,并将观测器输出补偿到自动驾驶仪。尽管以上控制方法能够在不同方面提高飞机飞行控制系统性能,但随着空投货物重量的增加,飞机运动状态会严重偏离工作点,控制器将难以保证良好的控制性能和鲁棒性。理论上,在空投全过程选择足够多的工作点对模型线性化可以解决上述问题<sup>[16]</sup>,但工作量非常大。学术界已提出了许多非线性控制方法,以进一步提高强非线性、强耦合运动系统的响应品质。基于反馈线性化理论的动态逆控制方法是应用最为广泛的非线性控制方法之一。

### 2.2 动态逆控制方法

动态逆控制方法是反馈线性化理论的分支,它已广泛应用于飞行器控制系统设计。仇江等<sup>[26]</sup>基于反馈线性化理论设计了重装空投动态逆控制器;张晶等<sup>[7]</sup>针对一类飞机重心实时变化的飞行控制问题,提出了一种基于动态逆思想和在线重心估计的控制方法。动态逆控制方法的不足之处是应用条件较为苛刻,要求精确已知被控对象的数学模型,状态信息可精确检测。实际上,不可能用数学模型精确表征重装空投过程复杂的非线性动态以及测量噪声等不确定性因素,并且飞机的气动系数是通过风洞实验和计算流体动力学模拟实验得到的,也必然存在一定程度的不确定性。因此,仅使用动态逆控制方法无法完全抵消系统的非线性特性。为克服动态逆方法对系统不确定性的鲁棒性缺失问题,文献<sup>[27]</sup>提出了基于动态逆控制

方法和  $H_{\infty}$  鲁棒控制方法相结合的方案,控制系统的内环采用动态逆控制对系统解耦线性化,外环设计  $H_{\infty}$  鲁棒控制器解决模型的不确定性问题。

### 2.3 滑模变结构控制方法

张惠媛等<sup>[28-33]</sup>基于微分几何反馈线性化与滑模变结构控制方法设计了重装空投纵向飞行控制器,该控制器利用反馈线性化对多变量交叉耦合的重装空投纵向运动模型解耦线性化,解决了系统的强非线性问题,在此基础上设计线性滑模变结构控制器,稳定飞机速度和俯仰姿态,提高了系统对模型不确定性的鲁棒性。文献[34]基于微分几何反馈线性化与线性滑模变结构控制方法设计了飞机横侧向姿态控制律,增强了低空空投时飞机的抗侧风能力。文献[28-34]设计的控制器从不同的方面提高了重装空投系统的性能,但存在较大的保守性。滑模控制切换增益要依据系统不确定性边界选取,而系统不确定性往往是一些复杂的非线性函数,比如飞机气动系数扰动与飞机、货物运动参数耦合构成的复杂非线性不确定性,实际中难以提前获得其边界。因此,为了保证滑模控制的鲁棒性,往往要将切换增益设定大一些,这会加剧滑模控制的抖振问题。采用准滑模控制或高阶滑模控制是解决抖振问题的有效方法,但是并没有解决切换增益选取依赖于系统不确定性边界的问题。为去除滑模控制器设计对系统不确定性边界的先验要求,有学者提出了基于切换增益自适应的滑模控制方法:如 LEE 等<sup>[35]</sup>引入等效控制思想实时调整滑模控制的切换增益,但它仍然要求系统不确定性边界已知;NASIRI 等<sup>[36-37]</sup>利用滑模面函数的跟踪误差范数对切换增益进行自适应调节,以克服系统不确定性;HSU 等<sup>[38]</sup>提出了基于模糊逻辑的切换增益自适应方法。由于理想滑模是不存在的,滑模面函数的跟踪误差不可能消除,因此,依据该误差构造增益自适应律会产生过度自适应的问题。此外,鲜有文献在设计自适应律时考虑滑模运动到达阶段系统初始误差对切换增益自适应的影响,即当系统初始相轨迹远离滑模面时,切换增益在初始时刻会迅速增加,但这个增加过程并不是由模型不确定性和扰动引起的,而主要是由系统初始误差造成的。文献[39]采用全局滑模控制技术,克服了滑模运动到达阶段系统初始误差对切换增益自适应的影响。

### 2.4 反步自适应控制方法

反步法在设计不确定系统的鲁棒控制器方面,特别是当不确定性不满足匹配条件时,具有明显的优越性。杨雨等<sup>[17]</sup>利用反步控制与滑模控制相结合的方法,设计了重装空投纵向滑模控制器,解决了系统存在非匹配不确定性时的控制问题,实现了空投过程中飞

机高度的稳定;文献[40]在货物出舱运动阶段采用反步控制器稳定飞机俯仰姿态,并考虑货物投放瞬间的飞行状态突变,设计一种鲁棒切换控制律完成后续控制;文献[41]基于反步法与滑模观测器理论设计了重装空投飞行控制器,该方法利用二阶滑模观测器观测系统不确定性和外界扰动,将观测器输出补偿到反步控制函数中,可避免选择过大的控制增益,降低了控制器设计的保守性。针对一类不确定非线性系统的控制问题,还可采用反步控制与自适应方法相结合的控制方案,如文献[42-43]将系统复杂的非线性不确定性函数分解成已知函数和未知的参数向量不确定性,然后利用自适应方法在线估计参数向量,该控制器结构更简单,设计难度相对较低。

自适应方法提供了一种直接面向期望性能或品质规范设计控制器的途径。文献[44]设计了面向飞行品质的鲁棒自适应飞行控制器,增强了飞行控制系统对未建模动态和外干扰的鲁棒性,但该方法存在高自适应增益下鲁棒性缺失的问题。近年来,CAO 在模型参考自适应基础上提出了  $L_1$  自适应方法,该方法对高自适应增益下的高频抖振及其激发的系统未建模动态具有较好的抑制作用<sup>[45]</sup>。文献[46]基于  $L_1$  自适应理论设计了重装空投过程纵向飞行控制器,进一步拓展了  $L_1$  自适应控制方法的应用,丰富了重装空投飞行控制领域的研究成果。

## 3 重装空投控制器设计面临的问题与挑战

### 3.1 尚无评估和确认的指标规范

当前,针对不同高度和模式下的空投任务,国内外尚无系统、完备的性能评价指标体系,使得飞行控制律的评估和确认无据可依。对于不同高度层的空投任务,其任务性能要求也不相同。例如,对于低空空投,为防止起落架和货物出舱斜板触地,飞机高度和俯仰角的变化范围严格受限;而对于中高空空投,它们的约束条件将被大大放宽。另一方面,飞行控制系统的控制性能将对空投时效性和货物着陆精度等任务完成质量产生重要影响。从查阅的资料来看,学术界还未针对不同高度层的空投任务特点,系统地给出飞机任务参数的安全性指标以及飞行控制系统快速性和准确性的评价标准。

### 3.2 复杂的任务模式使得控制律设计极具难度

从货物开始移动直至离机的过程中,飞机惯性参数和飞行状态都出现了大幅度的突变,因此控制律必须能够抑制突然的、大幅的扰动。另一方面,在描述飞机与货物的耦合运动关系时,目前学术界尚无一个公认的、普遍接受的动力学模型。对于飞机空投货物这

样的复杂系统,难以将诸如地面效应、发动机尾流对牵引系统和货物出舱过程的影响以及复杂的大气环境等因素进行全面的考虑。在尚未明确各种外界因素对空投系统的影响程度时,必须认为所建立的模型是存在较大不确定性的,故控制律还应该具备足够的鲁棒性。

由于空投高度和模式多样,因此难以采用一种飞行控制方法保证所有空投模式下的满意任务性能。执行中空空投任务时,由于飞机离地较高使得地面障碍对飞行安全性的威胁大大降低,因此飞行控制的主要目标是稳定飞机的俯仰姿态,而不必考虑飞机的高度模态。但是对于低空空投,为防止飞机触地,保证货物精确着陆,必须将高度作为一个主要的控制变量。此外,对于低空空投还应考虑地面效应和低速大气扰动等多因素耦合的不确定性。由于被控对象、控制目标和控制要求都不同,因此对于不同高度和模式的空投任务,其飞行控制律设计应该有针对性地分开进行,空投时,飞行员可根据任务特点切换不同模态的控制律。

### 3.3 缺少可以验证的半物理仿真实验平台

半物理地面仿真实验是飞行控制律从实验室设计走向工程实际的必由之路。从查阅的文献来看,鲜有针对重装空投半物理仿真实验平台的报道,而通过实际的空投试飞进行操控方法验证,不但财力、人力、物力消耗较大,而且空投本身是一项技术性要求非常强的任务,特别是低空重装空投要求更加严格,危险性非常大。因此,没有相应的半物理地面仿真实验验证将严重制约先进控制方法的工程化实现。

## 4 重装空投技术的发展方向

从查阅的文献来看,目前中空和高空小件货物的空投技术发展比较成熟,而针对低空重型装备、载人装备和精确空投技术的研究尚处于起步阶段。当投放重型武器装备时,为保证装备着陆的完好性、安全性和着陆精度,要求飞机必须保持低空低速的飞行状态。此外,战时为了提高武器装备的作战效能,掌握战争主动权,如坦克、装甲车等装备常常要载人空投。因此,低空重装、载人空投是空投领域的一个主要发展方向。

当投放救灾或军需物资时,有时由于地形、空域或敌方火力威胁限制,飞机无法进行低空飞行,但为了保证物资投放精度,要求飞机必须在中高空实现精确空投。因此,中高空精确空投是空投领域的另一主要发展方向。

## 5 结语

本文讨论了重装空投过程动力学建模的主要方法,阐述了线性控制、动态逆控制等 9 种先进控制方法在重

装空投控制器设计中的应用情况,分析了各种方法的特点和局限性,指出了重装空投控制器设计存在的问题与挑战——对于不同高度和模式的空投任务,应结合其特点有针对性地进行控制律设计,并亟需确立重装空投的控制律评估指标,研制半物理仿真验证平台。

## 参考文献

- [1] RAISSI K, MANI M, SABZEHPARVAR M, et al. A single heavy load airdrop and its effect on a reversible flight control system[J]. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2008, 80(4):400-407.
- [2] JANN T. Coupled simulation of cargo airdrop from a generic military transport aircraft [C]//*Proceedings of the 21st AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar*, Dublin, 2011;2560-2572.
- [3] RUTAN E L, STROUP F B. Evaluation of the C-130E stability and control characteristics during tandem, sequential and single-platform LAPES deliveries and airdrop deliveries [R]. Fort Belvoir: Defense Technical Information Center, 1967.
- [4] PIEPER J W. C-141A engineering flight test results of the aerial delivery system tests [R]. Calabasas: Lockheed-Georgia Company, 1966.
- [5] 胡兆丰,肖业伦. “运八”飞机投放重型货物问题的数值计算和模拟试验结果 [R]. 北京:北京航空学院, 1980.
- [6] 胡兆丰,肖业伦. 货物在舱内移动时飞机运动的研究方法 [R]. 北京:北京航空学院,1980.
- [7] ZHANG J, YANG L Y, SHEN G Z. Modeling and attitude control of aircraft with center of gravity variations [C]//*Aerospace Conference*, IEEE, 2009;1-11.
- [8] 韩铎铎,陆宇平. 运输机超低空空投重物动力学分析与  $H_{\infty}$  鲁棒控制设计 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2012,44(1):75-80.
- [9] ZHANG J X, XU H J, ZHANG D C, et al. Safety modeling and simulation of multi-factor coupling heavy-equipment airdrop [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2014, 27(5):1062-1069.
- [10] WU Z G, JING Z W, YANG C. Dynamic response analysis and experimental validation for airdrop of a flexible aircraft [C]//*Proceedings of AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, Honolulu, 2012;AIAA 2012-1468.
- [11] 赖志红. 飞机空投运动响应的数学模型 [R]. 北京:北京航空学院,1986.

- [12] 赖志红. 飞机空投模拟试验方法[R]. 北京:北京航空学院,1986.
- [13] 傅百先. Y-8 型飞机连续空投纵向动态分析[J]. 飞行力学,1993,11(1):81-87.
- [14] 欧阳绍修,丁重舜. 货物在货舱内移动时飞机动态特性的研究[J]. 飞行力学,1992,10(1):77-86.
- [15] 孙宝亭. 飞机连投货物实时仿真软件及应用[J]. 北京航空航天大学学报,1994,20(1):71-77.
- [16] FENG Y L, SHI Z K, TANG W. Dynamics modeling and control of large transport aircraft in heavy cargo extraction [J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2011, 9(2):231-236.
- [17] 杨雨,陆宇平. 运输机超低空重装空投纵向反步滑模控制研究[J]. 航空学报,2012,33(12):2301-2312.
- [18] YANG Y, LU Y P. The dynamic model of LAPES base on separate method [C]//*International Symposium on Systems and Control in Aeronautics and Astronautics, IEEE*, 2010:727-731.
- [19] 李大东,孙秀霞,董文瀚,等. 考虑多种影响因素下的改进重装空投系统建模[J]. 系统工程与电子技术,2013,35(2):447-451.
- [20] 韩艳铎,陆宇平. 重装空投动力学分析与控制方案研究[J]. 飞行力学,2011,29(3):28-31.
- [21] CUTHBERT P A. A software simulation of cargo drop tests [C]//*Proceedings of the 17th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar, Monterey*, 2003; AIAA 2003-2132.
- [22] CUTHBERT P A, CONLEY G L, DESABRAIS K J. A desktop application to simulate cargo drop tests [C]//*Proceedings of the 18th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar, Munich*, 2005; AIAA 2005-1623.
- [23] DESABRAIS K J. The motion and aerodynamics of an air-drop platform [C]//*Proceedings of the 22nd Applied Aerodynamics Conference and Exhibit, Rhode Island*, 2004; AIAA 2004-4845.
- [24] YANG X K, ZHONG Y W, YANG L Y, et al. Modeling and attitude control of aircraft with variations in mass and center of gravity [C]//*The 8th IEEE World Congress on Intelligent Control and Automation, Ji'nan*, 2010:323-329.
- [25] 杨晓科,杨凌宇. 变重量/重心飞机建模及姿态控制律设计[J]. 北京航空航天大学学报,2011,37(1):54-59.
- [26] QIU J, GAO Y K, HEI W J. Control law design for heavy cargo airdrop on low altitude based on dynamic inversion [C]//*Proceedings of Chinese Guidance, Navigation, and Control Conference, Shanghai*, 2010:532-539.
- [27] 冯艳丽,史忠科. 超低空空投货物出舱过程的动态逆鲁棒控制[J]. 控制工程,2010,17(5):579-583.
- [28] ZHANG H Y, SHI Z K. Variable structure control of catastrophic course in airdropping heavy cargo [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2009, 22(2):520-527.
- [29] 李大东,孙秀霞,董文瀚. 基于线性化反馈的滑模变结构重装空投纵向控制律设计[J]. 控制理论与应用,2013,30(1):54-59.
- [30] XU G Z, SUN X X. Heavyweight airdrop pitch flight control law design based on feedback linearization theory and variable structure control [C]//*Proceedings of the IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference (IEEE CGNCC2014), Yantai*, 2014:962-969.
- [31] 刘日,孙秀霞,董文瀚. 超低空空投拉平阶段混合迭代滑模控制[J]. 北京航空航天大学学报,2015,41(1):83-89.
- [32] LIU R, SUN X X, DONG W H. Dynamics modeling and control of a transport aircraft for ultra-low altitude airdrop [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2015, 28(2):478-487.
- [33] LIU R, SUN X X, DONG W H. Flight controller design for aircraft low altitude airdrop [J]. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2016, 88(6):689-696.
- [34] 刘日,孙秀霞. 反馈线性化超低空空投抗侧风滑模控制律设计[J]. 应用科学学报,2014,32(3):311-318.
- [35] LEE H, UTKIN V I. Chattering suppression methods in sliding mode control systems [J]. *Annual Reviews in Control*, 2007, 31(2):179-188.
- [36] NASIRI A, NGUANG S K, SWAIN A. Adaptive sliding mode control for a class of MIMO nonlinear systems with uncertainties [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2014, 351(4):2048-2061.
- [37] LIU R, SUN X X, DONG W H, et al. Finite-time adaptive sliding mode control for heavyweight airdrop operations [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2017, 28(2):338-346.
- [38] LIN C M, HSU C F. Guidance law design by adaptive fuzzy sliding-mode control [J]. *Journal of Guidance Control & Dynamics*, 2015, 25(2):248-256.
- [39] 刘日,孙秀霞,董文瀚. 运输机低空重装空投增益自适应滑模控制[J]. 控制理论与应用,2016,33(10):1337-1344.

线径传输线,并且合理控制传输长度,将有利于降低总线系统传输误码率,保证数据通信的高效正确性。

#### 4 结论

本文以航空机载总线的误码率性能为研究对象,提出了一种考虑传输信号衰减的误码率计算方法。通过微元法分析双绞线电路模型,与分布参数值相结合,导出传输线的传递函数和主要电气性能。与常用航空数据总线传输线参数值对应,分析出传输线物理参数线径和传输长度是影响信号衰减的主要因素,进一步从传输线本身电气性能角度分析总线误码。以 ARINC429 总线传输为例,在给定系统最小信噪比的情况下,利用信号衰减与误码率的数值模型计算不同线径屏蔽双绞线的误码率值。计算结果与实际情况相一致,验证了从传输线电气特性角度分析误码率方法的合理性,并为数据总线在允许范围内选择何种线径的传输线提供了理论参考依据。

#### 参 考 文 献

- [1] 唐宁,常青. 航空数据总线技术分析研究[J]. 现代电子技术,2014,37(4):64-69.
- [2] WATANABE K, SEKINE T, TAKAHASHI Y. A FDTD method for non uniform transmission line analysis using Yee's-lattice and wavelet expansion[C]//IEEE Mtt-S International Microwave Workshop Series on Signal Integrity and High-Speed Interconnects, 2009:83-86.
- [3] ZHOU Y H, SHI L H, CHENG G, et al. Combination of FDTD method with digital filter in analyzing the field-to-transmission line coupling[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2008, 50(4):1003-1007.
- [4] BUCCELLA C, FELIZIANI M, MANZI G, et al. Prediction of voltage and current propagation in twisted wire pairs (TWPs) by a circuit model[C]//International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Chicago, 2005:51-55.
- [5] HASSOUN F, TARAFI R, ZEDDAM A. Calculation of per-unit-length parameters for shielded and unshielded twisted pair cables[C]//The 17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, IEEE, 2006:250-253.
- [6] 昶旭曦. 基于 ADS 的时分制指令/响应型 1553B 总线系统建模[D]. 西安:西安电子科技大学,2011.
- [7] SPADACINI G, GRASSI F, MARLIANI F, et al. Transmission-line model for field-to-wire coupling in bundles of twisted-wire pairs above ground[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2014, 56(6):1682-1690.
- [8] 王若文. 飞机 ARINC429 总线数据传输正确性评估与测试[D]. 天津:中国民航大学,2016.
- [9] WANG D, YANG J, WANG Y. An equivalent model of pattern generator in jitter testing[J]. Physics Procedia, 2012, 24(2):1092-1099.
- [10] 刘建强,郑琼林,张永锋,等. CRH3 型动车组列车网络传输介质电气特性研究[J]. 机车电传动,2010(6):7-11.
- [11] MUSA S M, SADIKU M N O. Analysis of multiconductor quasi-TEM transmission lines and multimode waveguides[J]. International Journal of Engineering Research and Development, 2014, 10(5):87-93.
- [12] 宋娟,王立德,严翔,等. 列车控制网络专用双绞线传输特性的研究[J]. 铁道学报,2012,34(3):61-67.
- [13] KIM J, SHIN D, LEE J, et al. Statistical BER analysis due to supply voltage fluctuations at a single-ended buffer[C]//Design Conference, Santa Clara, 2013:1052-1071.
- [14] ARINC. ARINC429 protocol tutorial[M]. Santa Barbara: Condor Engineering, Inc., 2004.
- [15] ARINC. ARINC specification 429 part1-17: mark33-digital information transfer system (DITS) [S]. Maryland: Aeronautical Radio, Inc., 2004.
- [40] CHEN J, SHI Z K. Flight controller design of transport airdrop[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(5):600-606.
- [41] ZHANG C, CHEN Z J, WEI C. Sliding mode disturbance observer-based backstepping control for a transport aircraft[J]. Science China, 2014, 57(5):228-243.
- [42] LIU R, SUN X X, WANG D. Heavyweight airdrop flight control design using feedback linearization and adaptive sliding mode[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2016, 38(10):1155-1164.
- [43] LIU R, SUN X X, DONG W H, et al. Projection-based adaptive backstepping control of a transport aircraft for heavyweight airdrop[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2015(12):1-10.
- [44] 董文瀚,孙秀霞,林岩. 一种 Backstepping 模型参考鲁棒飞行控制律的设计[J]. 系统工程与电子技术,2010,32(7):1485-1488.
- [45] CAO C Y, HOVAKIMYAN N. Design and analysis of a novel L1 adaptive controller, part I: control signal and asymptotic stability[C]//Proceedings of the American Control Conference, IEEE, 2006:3397-3402.
- [46] LIU R, SUN X X, DONG W H, et al. Dynamics modeling and L1 adaptive control of a transport aircraft for heavyweight airdrop[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015(11):1-15.

(上接第 66 页)