

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.06.001

航天器模型预测控制方法综述

沈 强, 赵泽阳, 康泽禹, 张 祎

(上海交通大学航空航天学院, 上海 200240)

摘要: 随着人类航天活动的增加, 空间任务正朝着需要满足多重约束和高性能的方向发展。模型预测控制 (Model predictive control, MPC) 得益于其在处理约束优化问题上的能力, 近年来已在航天器控制中得到了广泛研究。本文首先回顾了 MPC 的发展历程, 并基于该方法的基本形式, 对其在航天器中的应用做了分类研究。然后, 针对空间环境中的不确定性, 依次总结鲁棒和随机两种 MPC 方法以及它们在航天器上的应用情况。在此基础上, 考虑到航天器的安全性问题, 总结现有研究中关于避障和容错的预测控制方法。针对 MPC 方法计算量大的缺陷, 本文也从控制器的求解策略和求解方式出发, 梳理了具有高计算效率的模型预测控制方法, 包括分散式/分布式方法以及显式方法。最后, 根据航天器的当前实际需求和未来发展, 为 MPC 方法在航天器控制中的进一步研究提出了几点建议。

关键词: 航天器控制; 模型预测控制; 不确定性; 安全性; 计算效率

中图分类号: V47 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2023)06-0941-15

Review on Model Predictive Control in Spacecraft

SHEN Qiang, ZHAO Zeyang, KANG Zeyu, ZHANG Yi

(School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: With increasing human space activities, space missions are evolving towards the need to meet multiple constraints and high performance. Due to the capability in handling constrained optimization problems, the model predictive control (MPC) has been widely studied in spacecraft control in recent years. This paper first reviews the development of MPC and categorizes its applications in spacecraft based on its basic form. Then, considering the uncertainty in space environments, the robust MPC and the stochastic MPC are summarized together with their applications. After that, the safety issues of spacecraft are taken into account and studies on obstacle avoidance and fault-tolerance are discussed in MPC framework. In addition, considering the high computational requirements of MPC, this paper also outlines some efficient methods from the perspectives of control strategy and optimization form, including decentralized/distributed MPC and explicit MPC methods. Finally, in consideration of the actual needs and future development of spacecraft, this paper provides several suggestions for further research on MPC in the spacecraft control area.

Key words: spacecraft control; model predictive control (MPC); uncertainty; safety; computational efficiency

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(62103275); 国家自然科学基金联合基金(U20B2054, U20B2056); 国家重点研发计划(2020YFC2200800)。

收稿日期: 2023-09-05; **修订日期:** 2023-11-20

作者简介: 沈强, 男, 副教授, 博士生导师。主要研究方向为航天器动力学与控制、故障诊断和容错控制、复杂任务轨迹规划以及模型识别和辨识等。中国航空学会制导导航与控制分会青年委员, 入选上海海外高层次人才引进计划, 获得 ICGNC2022 冯如优秀论文奖。发表学术论文 30 余篇, 主持国家自然科学基金、上海市科委自然科学基金、上海市科委扬帆计划等项目。

通信作者: 沈强, E-mail: qiangshen@sjtu.edu.cn。

引用格式: 沈强, 赵泽阳, 康泽禹, 等. 航天器模型预测控制方法综述[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(6):941-955.
SHEN Qiang, ZHAO Zeyang, KANG Zeyu, et al. Review on model predictive control in spacecraft[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(6):941-955.

自人类发射第一颗人造卫星以来,空间技术的发展日趋迅猛,空间探索活动日趋频繁。以低轨互联网星座、深空探测、在轨维护与服务等为代表的新兴空间任务,近年来受到了各航天大国的广泛关注。相比传统的空间任务,这些任务的系统规模更加庞大、系统约束和性能指标要求显著增加。例如,“天问一号”火星探测环绕器需要在地火转移及环绕探测过程中满足对地、对日、对火以及通信链路的姿态指向约束^[1-2];“嫦娥五号”在环月轨道交会对接需要满足视场范围约束与避障要求^[3];“天琴”和“太极”等空间引力波探测项目,需要满足三角形编队构型约束^[4]。约束和性能指标需求的增加对航天器控制系统的设计提出了更高的要求。为了保证航天器的对约束的满足性,并提升其性能,工程师和学者们在航天器控制方法上做了大量的探索。其中,模型预测控制(Model predictive control, MPC)得益于其处理优化问题和满足复杂约束的能力,近年来在航天器控制领域中被广泛关注^[5]。

模型预测控制最早起源于20世纪六七十年代^[6],在工业界发展至今已是除比例积分微分(Proportional integral derivative, PID)以外应用最多的控制方法^[7],同时其在稳定性分析方面的理论发展也趋于成熟^[8]。该方法的核心思想是滚动在线求解约束优化问题,即通过在每个采样时刻的状态测量和系统模型,求解有限时域优化问题,以得到未来的最优控制序列。在该方法中,控制器每次只执行控制序列中的第1个控制信号,并在下一个采样时刻重复上述过程。这种滚动优化求解机制使得模型预测控制在航天器控制领域拥有如下优势:(1)由于控制问题能被转化为标准的数学优化问题,MPC可以系统地处理各种类型的约束(如推力器饱和,最小脉冲比限制等);(2)基于模型的控制方法使得MPC能适用于不同的动力学模型,为高度非线性的航天器系统提供了不同的解决方案;(3)滚动计算的实时反馈特性使得MPC具有一定的鲁棒性,有利于在一定程度上抵抗航天器控制中的不确定性(如轨道摄动、挠性部件的扰动、液体燃料的晃动等);(4)继承于最优控制的控制思想,MPC可以通过设置性能指标函数(也称代价函数)实现最优控制性能(如燃料消耗少、最短时间到达等);(5)模型预测控制方法具有制导控制一体化的特性,既可以用于设计航天器的上层规划器,也可以用于构造基本的下层控制器;(6)在线的计算方式使得优化问题可以随时被重构,从而使航天器能及时调整优化目标和约束,应对执行机构故障等问题。

尽管模型预测控制有上述优点,该方法的在线优化机制不可避免地导致了庞大的计算量。尤其

是对于航天器控制系统来说,由于其计算资源有限,实际应用MPC尚有一定距离。此外,空间环境具有高度的不确定性,如何利用模型预测控制器提升航天器的抗干扰能力仍然是一个需要被广泛研究的问题。并且航天器的数量和太空任务复杂度呈逐年上升趋势。在这种情况下,航天器容易发生故障以及碰撞等安全性问题,研究考虑安全性的MPC具有重要意义。

基于以上3点,本文主要对MPC在航天器领域的研究做了简要回顾,并给出MPC控制方法在该领域的发展趋势。文章主要结构如下:第一部分回顾MPC的发展脉络并就其基本形式展开调研;第二部分总结MPC在处理不确定性问题上的研究,主要包括鲁棒MPC以及随机MPC两类方法;第三部分调研考虑安全性的MPC,聚焦于避障以及容错两方面问题;第四部分从计算角度出发,分别从求解策略以及求解方法上调研具有高计算效率的MPC方法;随后第五部分总结全文并给出MPC方法在航天器控制中的展望。

1 MPC发展历程与基本形式

1.1 MPC发展历程

模型预测控制器最先在工业中被成功应用,然后在理论上发展完善并逐渐扩展到其他行业。关于MPC的发展历史,国内外均有大量文献加以总结,部分可参考文献[6, 8-10]。结合近年来MPC的最新成果,本文将MPC的发展主要分为以下3个阶段。

第1个阶段主要是从20世纪60年代到80年代,此时的MPC方法以启发式为主,处理的约束也有限。在这个阶段,Propoi^[11]及Lee等^[12]首先提出了MPC“在线优化,滚动计算”的基本思想。该思想连接了20世纪60年代控制革命的两大主题(动态规划与极大值原理),并创新性地离线反馈控制律设计转化为在线最优开环控制策略计算。在此基础上,学者们分别提出了启发式模型预测控制^[13]、动态矩阵控制^[14]以及模型算法控制^[15]。这些控制方法均使用了工业上易于获得的非参数化模型,采用了滚动优化的求解机制,有较好的鲁棒性。因此,这些方法一经提出就在工业界得到了广泛的应用。另一方面,自适应控制领域的研究在这一阶段也促进了预测控制的发展。一个具有代表性的方法是Clarke等^[16-17]提出的广义预测控制(Generalized predictive control, GPC)。该方法采用了传递函数模型,相比来自工业界的方法更适合理论研究。然而,该方法无法处理多变量约束,可研究的问题相对有限。

从20世纪80年代末期起,MPC进入了第2个阶段。在这一阶段,学者们主要基于状态空间模型

开展研究,并更关注其理论性质,特别是稳定性方面的性质。为了确保MPC的稳定性,Chen等^[18]给出了MPC候选Lyapunov函数选择的基本方法;Kwon等^[19]给出了MPC优化问题的可行性证明思路。在此基础上,研究人员对原始的优化问题做了进一步修改,可大致总结为3类方法:终端等式约束法^[20]、终端代价函数法^[21]以及终端集方法^[22]。终端等式约束法具有形式简单和易于分析的特点,然而等式约束条件使得优化问题过于保守。终端代价函数法给出了有限时域优化问题的上界,使得其控制效果接近无限时域最优控制。然而,该方法只适用于无约束优化问题。相比之下,终端集约束法的保守性更低,应用也更广泛。为了使得利用终端集方法的MPC适用于更一般的非线性问题,学者们引入了终端集加终端约束的方法^[23]。在2000年,Mayne等^[8]在此基础上总结了稳定MPC算法的充分条件和证明思路,如今已成为设计稳定模型预测控制器的主流方法。

自21世纪开始以来,模型预测控制方法经历了迅猛发展,并且正呈现出井喷式的发展趋势。在这个时期,随着不同行业的需求不断增加,MPC理论得到了进一步拓展,并衍生出了许多不同的模型预测控制方法,如显式MPC^[24]、分散式与分布式MPC^[25]、事件触发MPC^[26]、数据驱动的MPC^[27]等。在航天领域,模型预测控制方法最早被应用于20世纪90年代末^[28-29],并在此后主要集中于解决航天器编队重构与保持、姿态控制、软着陆、交会对接以及深空探测等问题^[5]。在这些不同场景下,对MPC方法的研究已呈现出多样化的结果,本文将就此展开进一步的归纳总结。

1.2 MPC基本形式

模型预测控制的核心思想是在线求解优化问题,其一般的形式可由下述公式表示

$$\min_u J(t) \quad (1a)$$

$$\text{s.t. } x(k+1|t) = f(x(k|t), u(k|t)) \quad (1b)$$

$$x(k|t) \in X \quad k=1, 2, \dots, N-1 \quad (1c)$$

$$u(k|t) \in U \quad k=0, 1, \dots, N-1 \quad (1d)$$

$$x(0|t) = x(t) \quad (1e)$$

$$x(N|t) \in X_f \quad (1f)$$

式中

$$J(t) = \sum_{k=0}^{N-1} L(x(k|t), u(k|t)) + V_f(x(N|t))$$

式中: $J(t)$ 为代价函数,代表了系统的期望指标,由阶段项 $L(x, u)$ 和终端项 $V_f(x)$ 组成;约束(1b)代表系统模型, $x(k|t)$ 代表 t 时刻对第 $t+k$ 时刻的预测状态;约束(1c)和约束(1d)分别表示系统的状态约束和输入约束,其中 N 代表控制器的预测时域, X 和 U 分别表示约束集合;约束(1e)为初值约束,

$x(t)$ 为第 t 时刻的系统反馈状态;约束(1f)代表终端约束, X_f 为终端集。

在航天器控制中,目前对MPC的应用性研究已十分广泛。通过使用不同的动力学模型、代价函数和约束条件,学者们提出了不同的航天器MPC控制算法,取得了丰富的研究成果。接下来,本节将从这3个方面出发展开简要回顾。

1.2.1 系统模型

无论是姿态控制还是轨道控制,航天器的动力学模型一般具有非线性特性。在不同的任务和环境下,选择适合的动力学模型对于任务的成功至关重要。当非线性程度不高时,使用线性时不变(Linear time-invariant, LTI)模型满足近似实际系统。一个常用的情景是航天器近距离交会对接,可参考文献[30-32]。在这些文献中,研究者们均采用了对近圆轨道上相对运动近似较好的C-W方程。除此之外,一些文献将模型的非线性部分建立为扰动,然后通过增加控制器的鲁棒性来补偿扰动所带来的影响,如文献[33-34]。尽管线性时不变系统相对简单,当非线性程度增强或者系统偏离平衡点过远时,该方法不再适用。

为了增强对实际系统非线性特性的处理能力,同时保留线性系统的简洁性,研究人员分别在线性时变(Linear time-varying, LTV)系统以及分段仿射(Piecewise affine, PWA)系统上做了进一步研究。国内外相关研究可参考文献[35-38]。在航天器交会对接的不同阶段,文献[35]在模型上采用了不同的采样时长,得到了一个LTV模型,节省了MPC的计算负担。文献[36]运用了PWA模型,研究了下一代行星任务中的航天器精准自主着陆问题。在国内,哈尔滨工业大学吴爱国团队也分别利用PWA-MPC算法,对航天器的编队控制问题^[37]以及航天器与非合作目标的交会对接问题^[38]开展了研究。

除了上述利用线性系统的控制方法外,也有许多研究直接采用了非线性模型。针对卫星入轨时大旋转角和高角速率所带来的非线性特性,文献[39]利用基于四元数的姿态模型,成功进行了速率阻尼MPC控制。在此基础上,Ahmed等^[40]提出了一种次优化算法,解决了高角速率对非线性MPC方法造成的高计算量问题。文献[41]研究了柔性航天器的姿态机动问题。通过对纯刚性航天模型进行扩展,得到了具有鲁棒性的输出反馈MPC算法。文献[42]则将研究重点放在了欠驱动航天器系统上。通过利用非线性MPC的不连续控制特性,成功利用两个反作用飞轮对航天器进行了控制。在深空探测方面,文献[43]研究了绳系卫星在Halo轨道上的轨道保持问题。通过将非线性MPC与摄动法结合,在初始位置偏差较大的情况下也能

使卫星运动到目标轨道并做轨道保持。以上采用非线性模型的方法均能对实际系统进行很好的近似,具有较高的精度。然而,非线性控制问题设计相对复杂,且非线性优化问题往往是非凸的,具有容易陷入局部最优解和计算复杂度高的缺点。因此,采用非线性模型的MPC方法至今仍然是研究的重点之一。

1.2.2 代价函数

前文指出,现今常用的MPC算法,其代价函数一般由阶段项 $L(x, u)$ 和终端项 $V_f(x)$ 组成。终端项主要用于保证系统的稳定性,设计成二次型 $\|x\|_p^2 = x^T P x$ 的形式。其中权重矩阵 P 可通过求解一个Lyapunov方程得到,具体内容可参见文献[8]。阶段项主要包含系统要优化的性能指标,一般包括状态与输入与期望值的偏差项,以保证系统靠向期望目标。以调节控制问题为例(跟踪控制可转化为调节控制), $L(x, u)$ 通常可以采用二次型函数

$$L(x, u) = \|x\|_Q^2 + \|u\|_R^2 = x^T Q x + u^T R u \quad (2)$$

二次型代价函数具有良好的理论分析特性,且相应的二次规划求解算法也已十分成熟,因而应用较为广泛。除了这种性能指标外,也可将式(2)中的平方项去除,写成 l_2 范数,或者采用 l_1 范数和 l_∞ 范数的形式。对于这些类型的代价函数,相应的处理方法可以参考文献[5, 44-46]。

在一些问题中,除了需要考虑上述基本项外,还需要加入其他性能指标,如任务完成时长要求^[47]、考虑防撞的安全性要求^[48]、考虑编队保持的距离要求^[49]以及保证优化问题可行性的松弛性^[50]要求等。这些性能指标的加入会导致系统原有的性能发生退化,因而需要在设计控制器的时候做一定的权衡。

1.2.3 约束

在实际环境下,航天器会不可避免地受到各种约束限制。参考文献[51],可将约束总体分为3大类:状态约束、物理约束以及性能约束。

状态约束主要指系统状态能够到达的范围,如航天器编队间的最大通讯距离,卫星姿态机动所受到的指向约束以及再入返回器的安全走廊限制等。这一方面的研究可参考文献[34, 52-53]。其中,文献[34]研究了微纳卫星与非合作目标的对接问题。通过在目标对接位置设计安全走廊来约束状态,该方法保障了卫星的安全性。文献[52]针对卫星姿态控制的指向约束,设计了一种采用拉盖尔函数的MPC算法,成功控制了卫星对空间站的绕飞检查。文献[53]则以月地再入返回器为研究对象,分别设计了非线性MPC以及基于神经动力学的MPC并进行了控制仿真。

物理约束主要指执行机构限制,包括飞轮最大转速,可用飞轮个数,推力器最小脉冲比特以及推力方向限制等。针对飞轮最大力矩限制和电源功率的限制,文献[54]设计了MPC控制器并验证了系统在不违反约束情况下的姿态机动能力。Richards等^[55]考虑了推进器羽流对航天器的损害。通过在模型预测控制器中增加推力方向限制,他们在航天器编队和空间站绕两个应用场景上取得了极好的效果。此外,曹喜滨等^[45]在研究编队保持时考虑了推力器开关约束的影响;叶东等^[56]研究了有推力幅值和方向约束航天器交会问题;吴宝林等^[57]将推力器增量纳入了编队机动控制问题中。

性能约束主要包括安全性、暂稳态性能以及系统稳定性等改善性能的约束。在文献[35]中,研究人员使用了一种限制曲线超调量的约束,保证了航天器在对接方向上的安全性。此外,该方法将系统设定点作为优化变量,引入了设定点模型约束,从而扩大了控制问题的可行域并优化了交会路径。文献[58]提出了一种与旋转平台交会对接的模型预测控制方法。该方法考虑了线性递减的速度约束,成功实现了软对接的期望目标。前文提到的终端约束也属于这种类型的约束。该约束的设计保证了系统的稳定性,具体方法可参考文献[8]。

上述内容总结了在航天器MPC算法中应用不同约束的相关文献。可以看到,通过增加不同的约束条件,研究人员解决了多样化的问题。然而,如果约束条件施加过多,优化问题可能会出现无解或计算速度缓慢等问题。因此,在设计控制器时应适当对约束条件进行筛选或转化处理。

2 考虑不确定性的MPC

航天器本身和其所处的空间环境都充满各种扰动和不确定性,如航天器燃料的液体晃动、大挠性部件的震动、外部的太阳风以及引力摄动等。在实际情况中,这些扰动会造成控制性能的退化乃至控制方法的失效。尽管MPC本身的滚动优化机制能反馈系统的实时信息,具有一定的鲁棒性,但当扰动过大时,传统的MPC方法不再能保证控制器的有效性。因此,将系统的不确定性纳入到控制器设计问题中对于MPC在航天器上的实际应用具有重要意义。目前,现有考虑不确定性问题的MPC方法主要分为鲁棒模型预测控制(Robust model predictive control, RMPC)以及随机模型预测控制(Stochastic model predictive control, SMPC)两类,前者主要针对有界扰动问题,后者则研究随机扰动问题。本节将简要概述这两种方法的思想并总结其在航天器控制上的研究。

2.1 RMPC

RMPC主要处理有界扰动问题。现有的RM-

PC算法主要可分为两类,包括Min-Max方法和基于Tube的方法。Min-Max算法最早由Campo和Morari提出^[59],核心思想是将MPC的在线Min问题转化为Min-Max问题。通过将扰动作为最大化求解变量,并将控制序列作为最小化求解变量,该方法考虑了系统在扰动下最坏情况为

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_u \max_w J(t) \\ \text{s.t. } x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + Gw_k \\ x_k \in X \quad \forall w_k \in W; k = 1, 2, \dots, N-1 \\ u_k \in U \quad \forall w_k \in W; k = 0, 1, \dots, N-1 \\ x_0 = x(t) \\ x_N \in X_f \end{array} \right. \quad (3)$$

式中: $J(t)$ 的表达式与式(1)中一致; x_k 为 $x(k|t)$ 的缩写形式; w_k 表示扰动变量; G 表示扰动矩阵; W 为扰动集合,是一个包含原点的紧集。Min-Max方法处理约束的形式相对简单,因而在许多行业中被工程师所接纳采用^[60]。然而,该方法在航天领域应用较少,原因主要在于该算法每次都考虑了系统在扰动下的最坏情况,所得到的控制器过于保守。此外,Min-Max问题的实际的计算成本相对较高,不适用于对计算资源有高要求的航天器系统。

针对Min-Max方法的不足,研究人员提出了基于Tube的MPC方法(Tube-based MPC)^[61]。该方法采用了组合控制策略:先去除扰动得到标称系统的MPC最优控制序列,再利用鲁棒不变集设计反馈控制律,并在最后将两者加以组合。这种方式能够将系统的轨迹限定在标称轨迹周围的一个管状区域内(图1),故而称为基于Tube的方法。

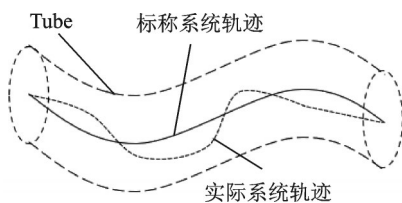


图1 基于Tube的MPC示意图

Fig.1 Illustration of tube-based MPC

Tube方法一般利用收缩集合的方式将实际系统转为标称系统。考虑具有加性扰动的线性系统,则相应的Tube算法可表述为

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_u J(t) \\ \text{s.t. } x_{k+1} = Ax_k + Bu_k \\ x_k \in X \ominus Z \quad k = 1, 2, \dots, N-1 \\ u_k \in U \ominus KZ \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \\ x_0 - x(t) \in Z \\ x_N \in X_f \ominus Z \end{array} \right. \quad (4)$$

式中: $J(t)$ 的表达式与(1)中一致; $X \ominus Z$ 表示两集

合的Pontryagin差集,定义为 $X \ominus Z = \{y \mid y + z \in X, z \in Z\}$; KZ 表示矩阵与集合的乘积,定义为 $KZ = \{y \mid y = Kz, z \in Z\}$; Z 和 K 分别表示鲁棒不变集和所设计的反馈控制律,需要保证条件

$$\forall x_k \in Z, \forall w_k \in W \Rightarrow (A + BK)x_k + Gw_k \in Z \quad (5)$$

根据Tube方法所设计的组合控制策略,若设式(4)所求解得到的标称轨迹和标称控制量分别为 \bar{x} 和 \bar{u} ,则对实际系统施加的控制律一般设计为

$$u = K(x - \bar{x}) + \bar{u} \quad (6)$$

在上述算法中,鲁棒不变集和反馈控制律均可离线设计^[62],而在线部分仅有对标称系统的优化计算,相比Min-Max方法计算量大大减少,因而更适用于航天器控制。此外,相比Min-Max方法,Tube方法没有局限于分析系统的最差性能,因而控制器的保守性大幅降低。

Tube算法的上述优点使得其在航天器鲁棒模型预测控制中被广泛应用,在国内外均开展了相应研究。Mammarella等^[63-64]最早将基于Tube的MPC运用到了航天器自主交会对接的接近阶段。通过利用线性矩阵不等式设计反馈增益矩阵并评估稳定性,保证了所设计算法的可实施性。相应的方法在数值仿真和气浮台实验上得到了验证。文献[65]利用Tube方法研究了与自由翻滚目标卫星的航天器交会机动问题,取得了期望的控制目标。针对同一种问题,文献[66]考虑了利用龙伯格观测器的输出反馈Tube方法,并提供了一种无需显式计算最小鲁棒不变集的方法,避免了鲁棒不变集计算的维度灾难问题。在姿态控制方面,Mirshams等^[67-68]最早利用了基于Tube的MPC。上述两篇文献中,Tube方法还与被动容错控制相结合,成功控制了欠驱动航天器系统。管萍等^[69]研究了大挠性航天器的姿态控制问题。通过将航天器挠性部件的振动以及外部干扰组合为复合扰动,所设计的鲁棒模型预测控制器能较好地跟踪姿态角指令。在编队构型保持方面,文献[70]研究利用了线性化的航天器相对运动方程并将空间摄动视为加性扰动,实现了静止轨道卫星编队的鲁棒控制。

目前,航天器控制领域中的Tube方法主要局限于应用最基本的Tube思想。随着控制理论的发展,Tube方法已衍生出了不同的变种,包括Homothetic Tube方法以及Parameterized Tube方法等^[60]。这些方法在现有的航天器RMPC控制中的相应研究尚有不足,有待进一步发展。

2.2 SMPC

在实际情况中,除了有界确定的扰动之外,更常见的是具有不确定性和无界的扰动。在航天器

系统中,这种不确定的扰动包括太阳风、低轨大气阻力、传感器噪声以及推进器的推力变化等。这种类型的扰动无法采用RMPC的方法来处理,因为扰动的无界性和随机性会导致约束被违反并且使得代价函数具有波动性。

针对上述问题,研究人员提出了SMPC方法^[71]。该方法的基本理念是利用扰动一般具有概率分布的特性,通过运用概率论、数理统计以及随机过程等数学工具来解决随机优化问题。与传统的MPC方法相比,SMPC一般将约束处理成为机会约束,即通过概率或者期望值的方式来表示约束,以解决约束违反的问题。此外,为了解决性能指标波动性的问题,SMPC计算的是代价函数的最小期望值。具体来说,若考虑具有的加性扰动的线性系统,设扰动是独立同分布的并满足随机分布律 $w_k \sim p_w$,则对应的随机优化问题可构建为

$$\begin{cases} \min_u E(J(t)) \\ \text{s.t. } x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + Gw_k \\ \Pr(x_k \in X) \geq 1 - \epsilon \quad k = 1, 2, \dots, N-1 \\ u_k \in U \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \\ E(x_0) = \bar{x}(t) \\ w_k \sim p_w \end{cases} \quad (7)$$

式中: $E(\cdot)$ 表示期望; $\Pr(\cdot)$ 表示概率; $\epsilon \in (0, 1]$ 表示约束的违反程度,是预先设置的算法参数; $\bar{x}(t)$ 表示 t 时刻系统状态的期望值。注意到上述优化问题没有显式地加入终端集。这是因为对于具有无界扰动的SMPC,稳定终端条件目前还完全令人满意的通用设计方式^[72]。

在SMPC方法的应用方面,一些学者在航天器场景中做了相应的研究。Mammarella等^[73]利用了一种基于采样的SMPC算法研究了航天器的自主交会接近问题。通过离线采样机制,降低了控制器在线计算的成本,成功在气浮台实验中得到了验证。文献^[74]研究了航天器姿态控制问题并提出了一种基于复合干扰观测器的SMPC方案。该方案能同时处理模型扰动,未建模误差以及随机噪声问题。针对地月空间中空间站交会对接问题,文献^[75]设计了基于机会约束的模型预测控制器,并将其用于地月 L_2 点的近矩形Halo轨道场景。文献^[76]研究了基于SMPC的编队重构问题。所提出的SMPC通过切比雪夫不等式被转化成了确定最优化问题,使得卫星编队能以较好的计算效率完成重构任务。

相比于鲁棒MPC,随机MPC在航天器上的应用研究目前相对较少,处于发展的起始阶段。考虑到航天器的实际环境一般存在随机不确定性,基于SMPC的航天器控制算法将是航天器MPC的发展趋势之一。

3 考虑安全性的MPC

航天器系统具有高昂的研发成本和难以随时维护的特点。为了充分利用航天器完成必要的任务,必须确保其控制系统具备保障航天器自主安全的能力。一方面,日益增长的空间碎片和失效航天器为航天器的在轨运行带来了严重的安全威胁,航天器需要有自主避障的能力。另一方面,航天器的执行机构和传感器可能会发生故障,在这种情况下,航天器应具有适当的容错能力,以保证自身尽可能安全地完成既定科学任务。本节将根据以上两点展开调研。

3.1 避障MPC

随着人类航天活动的增多,与日俱增的航天器数量以及空间碎片都严重威胁到了航天器的安全。在此情况下,航天器的避障能力是模型预测控制器设计的一项重要指标。在航天器MPC的控制框架中,现有文献的主要方法是将障碍物建模成扩展椭圆,并把避障要求转化为优化问题的约束来处理。由于该类约束属于非凸约束,因此现有的方法主要分为凸化方法以及直接应用法。

凸化方法主要是利用超平面,对障碍物的扩展椭圆做局部近似的方法。根据超平面的不同设计形式,这种方法又可细分为旋转超平面法、对偶超平面法以及直接线性化方法,如图2所示。

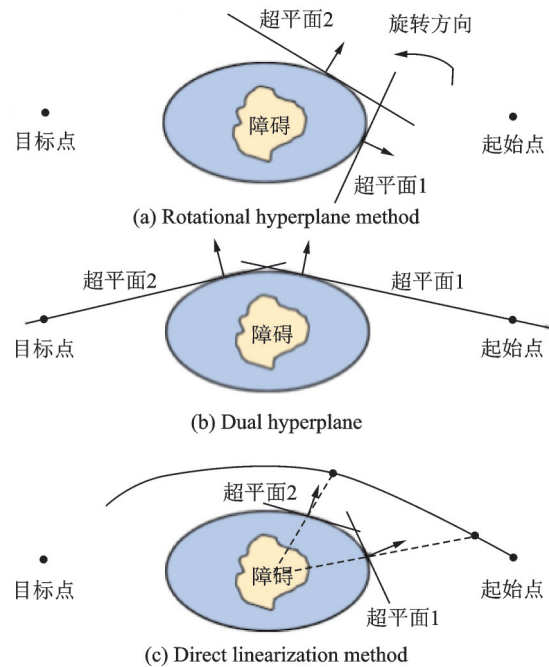


图2 避障约束的凸化方法

Fig.2 Convexification methods for obstacle avoidance constraint method

旋转超平面法人为设定旋转速度,并在扩展椭圆相应参考点求解对应的超平面。利用这种方法,文献^[35]以及文献^[58]分别在二维和三维情况下

研究了航天器交会对接问题。对偶超平面法根据起始点和目标点设计两个超平面来凸化避障约束。该方法最早由Park等^[77]在研究航天器的二维交会接近问题时提出,并在文献[78]中扩展到了三维。直接线性化方法根据参考轨迹与椭球中心的连线生成参考点,并在对应参考点处求得超平面。文献[30]利用这种方法保证了航天器的安全性。在文献[78]中,作者在优化问题递归可行性以及燃料最优性方面对以上3种方法做了对比。通过对比可知,直接线性化方法在递归可行性与燃料最优性问题上效果均较好,旋转超平面法次之,对偶超平面最差。然而,在二维的问题中,对偶超平面在优化问题可行性方面能取得较好的效果。在以上文献中,凸化方法均取得了较好的计算效率,具有实时性。

直接应用法是利用非凸优化求解器直接处理非凸约束。文献[77]将这种方法与利用对偶超平面的凸化方法做了对比。通过物理实验和仿真验证,结果表明直接应用法的计算延迟较高,在实际的测试实验中发生约束违背的现象。然而,由于该方法显式地考虑了原始安全约束,因此整体性能更好。文献[79]利用直接应用法还考虑了多个移动障碍物的情况,结果表明该方法比凸化方法有更高的灵活性。

除了以上两类方法外,现有考虑避障的MPC方法还包括人工势函数法以及控制障碍函数法等方法。这些方法目前已在无人机以及机器人等领域得到了一定研究^[80-81],然而在航天器控领域,这些方法相关研究尚有不足。因此,对航天器避障问题的研究仍然是未来值得探讨的问题。

3.2 容错MPC

在航天工程领域,由于复杂的太空环境因素以及人为因素在航天器设计和研发过程中的制约,航天器故障时有发生。这些故障可能会导致航天器失控。为了提高系统的安全性和对故障的容错能力,研究人员将容错机制和故障诊断融入到了控制器设计中,提出了容错控制方法^[82]。容错控制(Fault-tolerant control, FTC)可分为主动容错控制和被动容错控制两类^[83-84]。前者侧重于通过故障诊断来调整故障。这种方法的优点是能灵活处理各种类型的故障并且保守性相对较弱。该方法的不足是计算量较大,计算时间较长,可能导致系统失稳。被动容错方法侧重于将故障视为干扰,并在设计控制器时考虑可能出现的故障,通过设计一个强鲁棒控制器保证系统安全。这种方法的优点是避免了在线计算的时延问题。然而,由于需要预先考虑可能的故障情况,该方法过于保守,且可处理的故障情况有限。

得益于模型预测控制显式处理模型和约束的能力,MPC方法也被应用到容错控制问题中^[85-87]。在主动容错MPC方法中,现有的研究主要采用多模型的框架,即通过对故障的估计,实时修改MPC优化问题中的模型和约束^[88]。这种框架下的研究重点主要集中在故障诊断上^[89-90]。尽管此类方式在实际执行中相对简单,但大量的在线计算会使得系统延迟时间过长,造成难以预计的后果。针对上述问题,研究人员提出了使用显式MPC的替代方案^[91-93]。该方法使用多参数规划方法离线求解优化问题,然后以在线查表的方式选择相应的控制律。尽管这种离线方式节约了计算量,但由于无法实时改写系统模型,其在处理模型失配问题上有所不足。对此,文献[94]提出了一种新的显式容错MPC方法。通过多个表示不同系统状态的模型加权,在线求解权重参数,解决了模型与实际系统的匹配性问题。

另一方面,在被动容错MPC方法中,现有的主要方法均是将故障作为系统干扰,采用鲁棒MPC方法进行控制器设计。文献[95]与前文提到的文献[63-64]均采用了基于Tube的RMPC方法来处理航天器故障。在文献[95]中,研究人员设计了一个滑模辅助控制器来表示扰动和故障的上边界,保证了所设计的Tube在两种不确定情况下都有鲁棒不变性。文献[96]结合MPC和滑模控制的优点,分别研究了外环用滑模控制、内环用容错MPC,以及外环用MPC、内环用容错滑模控制的两类控制器。通过在柔性航天器姿态控制上的仿真验证,前者被证明有更好的控制效果。文献[97]研究了含有作动器软故障的航天器姿态控制问题,提出了一种基于显式MPC的鲁棒容错控制器。该方法显式地将故障表达式建模至优化问题中,对执行机构故障情况下的航天器姿态控制取得了较好的结果。

针对航天器的容错MPC的研究相对较少,但近两年呈上升趋势。随着航天任务朝着复杂化发展,容错算法的需求会进一步上升。此外,航天器的计算算力正逐年提升,利用容错机制的MPC算法有着极大的发展前景。

4 考虑计算效率的MPC

相比其他控制方法,MPC具有计算量大的不足。尽管该方法在化工过程、机器人以及自动驾驶领域已有了广泛的工业应用和研究,但距离航天领域实际应用尚有一定差距。首先,航天器的计算资源有限。为了保证可靠性,航天器上的计算机一般不会使用高度集成的芯片,因而性能远不如地面设备。其次,相比于其他系统,航天器具有推力小,机动范围大的特点。对于这类被控对象,使用带有终

端约束的MPC方法需要较多的预测步数才可保证可行性,这使得在航天器上应用MPC需要较高的计算量。第三,考虑非线性系统以及非凸约束时,MPC需要求解非凸优化问题,求解时间过长。

为了改进MPC并提升其在航天器中的可用性,研究人员提出了一些提高计算效率的MPC算法,包括前文提到的凸化方法、事件触发方法、分散式/分布式方法以及显式MPC方法等。其中事件触发方法^[98-99]分析复杂,目前在航天器上的应用比较有限,而分布式/分散式方法以及显式MPC方法的研究相对较多。前者主要以求解策略为出发点,提升多航天器系统以及大规模系统的求解效率;后者则聚焦求解方法本身,将优化问题的在线计算转为离线处理,提升了控制器的实时性。下面针对这两种方法分别阐述。

4.1 分散式/分布式MPC

新兴空间任务的出现使得传统的单一航天器越来越难以满足需求。为了提高任务执行的效率和灵活性,工程师和学者们开始研究利用航天器编队或分布式航天器进行协同操作的方法。在这类问题中,航天器的自主路径规划与控制始终是一个重要课题。为了保证编队系统的全局最优性能,选择一个中心航天器对所有航天器的轨迹进行计算求解是一个常用的方法。然而,这种集中式的求解方式对中心航天器的计算资源要求相对较高,不适用于大规模编队系统。

近年来,为了降低编队系统中主航天器的计算量,并合理配置计算资源分布,分散式以及分布式结构的MPC方法受到了更多的关注,如图3所示。这两种控制器均起源于网络控制,而后在多智能体问题中得到了大量研究,迄今为止已经形成了丰富的研究成果^[100-101]。

分散式MPC(Decentralized MPC)的核心思想是利用MPC单独控制每个子系统。在这种方法中,控制器之间是互相独立的,每个个体在做优化求解时没有信息交互。这种类型的控制器一般适用于个体间约束耦合性不强的编队控制问题。文献[102]研究了大规模星群的最优制导与重构问题。通过利用序列二次规划求解具有时变防撞约束的最优化问题,所提出的分散式MPC取得了较好的效果。针对失效卫星脱轨后的卫星星座重构问题,文献[103]基于是否采用局部信息,设计对比了两种分散式MPC方案。通过仿真验证,研究人员得出了增加局部信息的使用将改善控制性能的结论。文献[104]则研究了将编队的整体优化问题拆解成个体局部优化问题的方法。结果表明,该方法消除了个体间的通信链路,但系统的控制性能仍依赖于对邻居信息的估计值。通过以上研究可以看出,虽然分散式MPC在计算效率上相对集中式

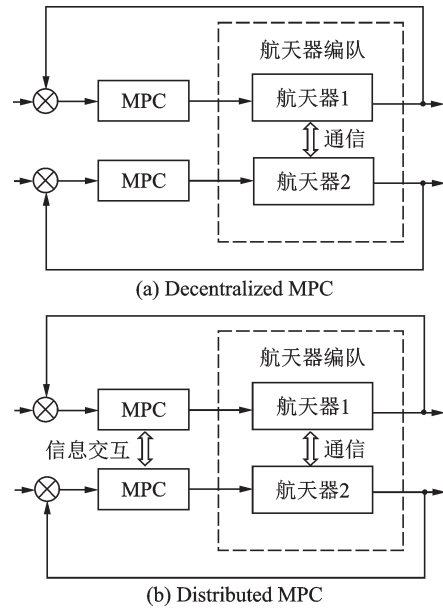


图3 分散式与分布式MPC结构框图

Fig.3 Structure diagrams of decentralized MPC and distributed MPC

MPC方法有所提升,但全局性能有待改进,而增加信息交互是一种有效的改进方式。

分布式MPC(Distributed MPC)在分散式MPC的基础上保留控制器之间的信息交互。在这种方法中,其他个体信息的引入使得每个个体在做优化问题时均能做出一定“让步”,从而改善了编队整体的全局性能。除此之外,信息交互方式的多样性也使得分布式MPC衍生出了多种不同的算法。一方面,从个体的优化性能指标来看,其可以分为协作式和非协作式两种方法。其中,前者以整个编队的性能指标作为优化目标,全局性能更好;后者则只考虑了自身的性能指标,计算和通信负担较小。另一方面,从计算方式来看,其主要可分为同步式、序列式以及迭代式3种方法。在单个采样步长内,同步式分布式MPC同时求解所有个体的优化问题,计算量小且响应较快;序列式分布式MPC与迭代式分布式MPC则分别以顺序和迭代的方式求解,具有较好的全局性能。

分布式MPC在算法和理论上的发展也带动了其在航天器编队上的应用研究。针对具有故障的卫星编队,文献[49]提出了一种采用双层控制结构的容错分布式MPC方法。与集中式容错方案相比,分布式方案对通信带宽的要求更低。文献[105]利用非协作式的同步分布式MPC方法研究了采用领航跟随法的编队控制问题,在满足所有约束的情况下,对给定的目标实现了较好的跟踪。文献[106]则研究了卫星编队通信拓扑结构对分布式MPC控制性能的影响。研究表明,当通信拓扑中存在生成树时,分布式MPC的控制效果较好。

除了在编队方面的应用外,分布式MPC的控

制思想也应用在航天器控制的其他方面。在姿态控制问题上,文献[107]将分布式MPC策略运用到了反作用飞轮和磁力矩器的组合控制上,取得了较好的效果。文献[108]研究了大型空间结构的装配问题,提出了一种分布式自适应模型预测控制方法。所提出的算法能有效抑制因装配模块间弱碰撞而产生的振动。文献[109]将分布式控制方法用在了空间太阳能电站的研究中。通过组合利用天线控制器、桁架结构控制器和太阳能电池控制器,所提出的分布式MPC策略能实现电站的姿态指向要求。

目前,分散式MPC和分布式MPC在航天器上的理论和应用研究仍然是研究的热点之一。特别是分布式MPC,随着近年来多智能体系统的发展,在算法上正呈现出多样化的研究结果。这些算法有望进一步推动分布式MPC在航天中的应用研究,具有极大前景。

4.2 显式MPC

在上述分散式及分布式MPC方法中,计算效率的提高主要聚焦于调整控制问题的求解策略。这种策略只能实施于大规模系统以及编队系统。针对MPC本身在线滚动求解方法的高计算量特性,本小节将介绍显式MPC方法(Explicit MPC, EMPC)。

EMPC最早由Bemporad等^[24]提出,其核心思想是利用多参数规划理论,将在线的优化问题转化为以初值为参数的离线优化问题。对于有线性约束和二次性能指标的问题,该方法通过标准的多参数规划求解程序,能够得到一组分段线性连续的控制律以及这些控制律对应的区域划分,即

$$u(x) = \begin{cases} F_1 x + g_1 & x \in X_1 \\ F_2 x + g_2 & x \in X_2 \\ \vdots & \vdots \\ F_M x + g_M & x \in X_M \end{cases} \quad (8)$$

式中: F_i 与 g_i 表示线性反馈控制律的系数; M 表示划分区域个数; X_i 表示划分的区域。通过将这组控制律和区域划分存储在航天器中,EMPC能够以在线查表的形式对航天器进行快速控制。

显式MPC的这种离线求解、在线查表的方式极大地减少了控制器的计算负担,使得其更适用于像航天器这样的高动态系统。针对卫星的姿态控制问题,文献[110]设计了一个显式MPC控制器并将其用于欧洲航天局的SSETI/ESEO微型卫星进行仿真,取得了较好的控制结果。文献[111]利用EMPC研究了小推力航天器的自主交会与接近问题。在该方法中,研究人员将拉盖尔函数与多参数规划技术相结合,减少了优化变量的个数,有效地提升了控制效率。文献[50]研究了航天器的交会对接问题。在非旋转对接的情况下,EMPC方法

取得了较好的结果。然而,该文献指出,在旋转交会对接的情况下,对旋转目标航天器的实时预测是任务成功的必要条件,EMPC方法在此时不再适用。

文献[50]的不适用情况表明了EMPC的局限性,即其不易处理时变的在线优化问题。此外,对于EMPC本身来说,区域划分随着预测时长的增加而指数增长。此时不仅会造成离线求解计算量过大,也会导致过度占用控制器的内存。在这一方面,尽管已有众多研究对此做了改进^[112],关于这些方法在航天器应用上的研究仍相对较少,有待进一步发展。

5 总结与展望

当前,随着计算机硬件算力的显著提升,MPC方法在空间探测领域正迎来崭新的发展机遇。意大利航天局的“PRISMA”项目^[113]已将约束优化问题的在线求解成功应用于航天器编队的制导设计中。欧洲航天局的“ORCSAT”^[114]以及“RobMPC”^[115]两个项目也分别利用MPC在火星采样返回和星球车自主控制上开展了相关研究。随着空间任务朝复杂化和多样化方向发展,航天器对自主约束处理以及性能改善的需求显著提升,利用MPC方法控制航天器具有重要的现实意义。根据当前MPC在航天器控制领域的研究进展和需要解决的问题,本文做了简要梳理并总结了以下几点发展方向。

(1) 基于航天器的抗干扰需求

航天器自身以及外部环境的不确定性会对控制器的效果产生显著影响。为了利用模型预测控制提高航天器的抗干扰能力,现有的研究主要聚焦于基于Tube的RMPC以及SMPC两种方法。目前这两种方法在控制理论领域已衍生出了不同的算法分支,在未来可以考虑其进一步的应用性研究。

(2) 基于航天器的避障需求

为了保证航天器安全地完成科学任务,航天器需有自主避障的能力。目前,航天器中的MPC避障算法以凸化方法为主。尽管这种方法在计算效率上有优势,但控制器的性能有所牺牲。相比之下,基于非凸约束的直接优化方法具有更好的性能,但计算时间较长,容易陷入局部最优。因此,在保证性能的前提下,未来研究快速非凸优化求解算法具有重要意义。此外,在无人机和机器人领域,基于MPC的避障方法研究已取得了丰富的研究成果,如控制障碍函数等方法。未来可以基于航天场景对这些方法展开深入研究。

(3) 基于航天器的故障处理需求

空间任务正朝着复杂化方向发展。在此情况

下,航天器系统规模不断扩大,工作场景更加严苛,因而出现故障的概率更高。为了保证在故障情况下仍能安全地完成任,航天器应有较好的容错机制。目前,MPC框架下的容错算法研究较少,未来可以进一步开展对容错算法的研究。

(4) 基于航天器的有限资源需求

目前,MPC在工业中已有较多应用,而在航天器上距离广泛应用尚有差距。主要原因在于航天器本身的资源限制更多,且小推力大尺度的系统特点使得MPC的计算需求更大。因此,在航天器上利用MPC需要采用更高效的方法。前文总结了分散式与分布式MPC以及显式MPC两种考虑计算效率的方法。其中,分散式/分布式MPC主要从求解策略上提升了多航天器系统以及大规模系统的计算效率。关于这方面的算法,近年来对多智能体问题的研究已呈现出多样化的成果,未来可以考虑在航天器上做应用性研究。显式MPC则从求解方法上提升了计算的实时性。虽然该方法利用多参数优化解决了MPC的在线计算问题,但随着预测步长和系统维数的增多,该方法在内存使用上有着较大的缺点。因此,未来在这方面的研究可以进一步考虑减少分区的显式MPC方法。除了上述两种方法外,前文略有提及的事件触发方法也在提升MPC的计算效率上有较好的结果。尽管目前该方法在航天器控制领域中的研究不多,但在网络控制领域已经有了丰富的成果。该方法能根据系统性能来判断是否需要重新做优化计算,因此在航天器MPC上具有广阔的应用前景。

除了本文提及的MPC方法外,由于近年来关于深空探测、在轨组装、在轨服务等新兴空间任务场景对航天器提出了更高的要求,未来相对应的研究还可聚焦于以下两个方面。

(1) 从航天器的复杂任务角度

未来,新兴航天任务通常包含多个复杂子任务,且任务的先后顺序以及持续时间都有特定的要求(如航天器依次访问不同区域并停留若干时长)。在这种情况下,航天器不仅需要处理空间上的约束,更要有能力处理时序上的约束。目前,在无人机以及机器人领域,考虑时序约束的MPC方法近年来成为了研究的热点^[116-117],然而这些方法目前在航天领域相关研究较少。考虑到未来空间任务的实际需求,在航天器上研究具有时序约束的MPC方法具有积极意义。

(2) 从航天器的智能化角度

当前,机器学习的发展正在推动着控制领域的变革,控制方法呈现出智能化的发展趋势。随着新型空间任务对航天器的要求升高,利用基于学习的控制方法具有巨大潜力。在近几年的航天器控制研究中,已有相关文献对基于学习的MPC方法展

开了尝试。文献[118]通过MPC方法生成数据集,并以此训练了一个卷积神经网络来控制组合航天器,降低了计算资源需求。文献[119]利用强化学习和监督学习捕获了航天器未建模动力学特征,并在星群问题中对邻近卫星的轨迹做了准确预测。文献[120]考虑了基于深度强化学习航天器自主姿态控制,在性能和计算时间上都取得了较好的结果。从以上文献来看,基于学习的MPC方法在模型逼近、计算效率以及序列预测方面均有较大的优势。然而,由于目前的学习方法的内部机理尚不明确,基于学习的MPC在稳定性保证和参数选择上还有进一步研究的空间。

参考文献:

- [1] 聂钦博,王卫华,谭晓宇,等.火星环绕器GNC系统设计与实现[J].上海航天(中英文),2022,39:104-109.
NIE Qinbo, WANG Weihua, TAN Xiaoyu, et al. Design and realization of GNC system for Mars orbiter [J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2022, 39: 104-109.
- [2] 朱庆华,王卫华,刘付成,等.“天问一号”火星探测环绕器导航制导与控制技术[J].深空探测学报(中英文),2023,10:11-18.
ZHU Qinghua, WANG Weihua, LIU Fucheng, et al. Navigation, guidance and control technology of Mars exploration [J]. Journal of Deep Space Exploration (Chinese & English), 2023, 10: 11-18.
- [3] 张玉花,梅海,赵晨,等.嫦娥五号轨道器的创新与实践[J].上海航天(中英文),2020,37:1-10.
ZHANG Yuhua, MEI Hai, ZHAO Chen, et al. Innovation and practice of Chang'e-5 orbiter [J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2020, 37: 1-10.
- [4] 吴树范,王楠,龚德仁.引力波探测科学任务关键技术[J].深空探测学报,2020,7:118-127.
WU Shufan, WANG Nan, GONG Deren. Key technologies for space science gravitational wave detection [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7: 118-127.
- [5] EREN U, PRACH A, KOÇER B B, et al. Model predictive control in aerospace systems: Current state and opportunities [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2017, 40(7): 1541-1566.
- [6] 席裕庚,李德伟,林姝.模型预测控制——现状与挑战[J].自动化学报,2013,39(3):222-236.
XI Yugeng, LI Dewei, LIN Shu. Model predictive control—Status and Challenges [J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(3): 222-236.
- [7] QIN S J, BADGWELL T A. A survey of industrial model predictive control technology [J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(7): 733-764.
- [8] MAYNE D Q, RAWLINGS J B, RAO C V, et al. Constrained model predictive control: Stability and op-

- tinality. *Automatica*, 2000, 36(6): 789-814.
- [9] LEE J H. Model predictive control: Review of the three decades of development[J]. *International Journal of Control Automation & Systems*, 2011, 9(3): 415-424.
- [10] 席裕庚,李德伟. 预测控制定性综合理论的基本思路和研究现状[J]. *自动化学报*, 2008, 34(10): 1225-1234. XI Yugeng, LI Dewei. Fundamental philosophy and status of qualitative synthesis of model predictive control [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2008, 34 (10) : 1225-1234.
- [11] PROPOI A I. Use of linear programming methods for synthesizing sampled-data automatic systems[J]. *Automation and Remote Control*, 1963, 24(7): 837-844.
- [12] LEE E B, MARKUS L. *Foundations of optimal control Theory*[M]. New York: Wiley, 1967.
- [13] RICHALET J, RAULT A, TESTUD J, et al. Model predictive heuristic control: Applications to industrial process[J]. *Automatica*, 1978, 14(5): 413-428.
- [14] CUTLER C R, RAMAKER B L. Dynamic matrix control—A computer control algorithm[C]//*Proceedings of Joint Automatic Control Conference*. San Francisco, USA:[s.n.], 1980.
- [15] ROUHANI R, MEHRA R K. Model algorithmic control (MAC): Basic theoretical properties[J]. *Automatica*, 1982, 18(4): 401-414.
- [16] CLARKE D W, MOHTADI C, TUFFS P S. Generalized predictive control—Part I . The basic algorithm [J]. *Automatica*, 1987, 23(2): 137-148.
- [17] CLARKE D W, MOHTADI C, TUFFS P S. Generalized predictive control—Part II . Extensions and interpretations[J]. *Automatica*, 1987, 23(2): 149-160.
- [18] CHEN C C, SHAW L. On receding horizon feedback control[J]. *Automatica*, 1982, 18(3): 349-352.
- [19] KWON W, PEARSON A. On feedback stabilization of time-varying discrete linear systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1978, 23(3): 479-481.
- [20] KEERTHI S S, GILBERT E G. Optimal infinite-horizon feedback laws for a general class of constrained discrete-time systems: Stability and moving-horizon approximations[J]. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 1988, 57: 265-293.
- [21] RAWLINGS J B, MUSKE K R. The stability of constrained receding horizon control[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1993, 38(10): 1512-1516.
- [22] MICHALSKA H, MAYNE D Q. Robust receding horizon control of constrained nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1993, 38 (11): 1623-1633.
- [23] CHEN H, ALLGÖWER F. *Nonlinear model predictive control schemes with guaranteed stability: Nonlinear model based process control*[M]. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 1998: 465-494.
- [24] BEMPORAD A, MORARI M, DUA V, et al. The explicit linear quadratic regulator for constrained systems[J]. *Automatica*, 2002, 38(1): 3-20.
- [25] CAMPONOGARA E, JIA D, KROGH B H, et al. Distributed model predictive control[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2002, 22(1): 44-52.
- [26] EQTAMI A, DIMAROGONAS D V, KYRIAKOPOULOS K J. Event-triggered strategies for decentralized model predictive controllers[J]. *IFAC Proceedings*, 2011, 44(1): 10068-10073.
- [27] HEWING L, WABERSICH K P, MENNER M, et al. Learning-based model predictive control: Toward safe learning in control[J]. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 2020, 3: 269-296.
- [28] MANIKONDA V, ARAMBEL P O, GOPINATHAN M, et al. A model predictive control-based approach for spacecraft formation keeping and attitude control[C]//*Proceedings of the 1999 American Control Conference*. San Diego, USA: IEEE, 1999: 4258-4262.
- [29] WEN J T, SEEREERAM S, BAYARD D S. Non-linear predictive control applied to spacecraft attitude control[C]//*Proceedings of the 1997 American Control Conference*. Albuquerque, USA: IEEE, 1997: 1899-1903.
- [30] LI Q, YUAN J, ZHANG B, et al. Model predictive control for autonomous rendezvous and docking with a tumbling target[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2017, 69: 700-711.
- [31] ZAGARIS C, PARK H, VIRGILI-LLOP J, et al. Model predictive control of spacecraft relative motion with convexified keep-out-zone constraints[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2018, 41(9): 2054-2062.
- [32] SINGH L, BORTOLAMI S, PAGE L. Optimal guidance and thruster control in orbital approach and rendezvous for docking using model predictive control [C]//*Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*. Toronto, Canada: AIAA, 2010: 7754.
- [33] 管萍,黄明亮,戈新生,等. 大挠性航天器的模糊模型预测控制[J]. *航天控制*, 2023, 41(3): 43-49. GUAN Ping, HUANG Mingliang, GE Xinsheng, et al. Fuzzy model predictive attitude control for large flexible spacecraft[J]. *Aerospace Control*, 2023, 41 (3): 43-49.
- [34] 赵玲,陈丹鹤,廖文和,等. 微纳卫星与非合作翻滚目标对接的模型预测控制[J]. *宇航学报*, 2023, 44 (3):431-442. ZHAO Ling, CHEN Danhe, LIAO Wenhe, et al. Model predictive control for docking of micro-nano satellite and non-cooperative tumbling target[J]. *Journal of Astronautics*, 2023, 44(3): 431-442.
- [35] WEISS A, BALDWIN M, ERWIN R S, et al. Mod-

- el predictive control for spacecraft rendezvous and docking: Strategies for handling constraints and case studie[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, 23(4): 1638-1647.
- [36] LEE U, MESBAHI M. Constrained autonomous precision landing via dual quaternions and model predictive control[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2017, 40(2): 292-308.
- [37] 纪友州. 基于对偶四元数姿轨一体化模型的航天器编队控制[D]. 深圳: 哈尔滨工业大学(深圳), 2022. JI Youzhou. Spacecraft formation control based on attitude orbit integrated model using dual quaternion[D]. Shenzhen: Harbin Institute of Technology (Shenzhen), 2022.
- [38] 李东庭. 非合作目标视觉位姿估计与交会对接模型预测控制[D]. 深圳: 哈尔滨工业大学(深圳), 2022. LI Dongting. Visual pose estimation and model predictive control for rendezvous and docking with a non-cooperative target[D]. Shenzhen: Harbin Institute of Technology (Shenzhen), 2022.
- [39] BÖHM C, MERK M, FICHTER W, et al. Spacecraft rate damping with predictive control using magnetic actuators only[J]. *Nonlinear Model Predictive Control: Towards New Challenging Applications*, 2009, 384: 511-520.
- [40] AHMED S, KERRIGAN E C. Suboptimal predictive control for satellite detumbling[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2014, 37(3): 850-859.
- [41] BANG H, OH C S. Predictive control for the attitude maneuver of a flexible spacecraft[J]. *Aerospace Science And Technology*, 2004, 8(5): 443-452.
- [42] PETERSEN C D, LEVE F, KOLMANOVSKY I. Model predictive control of an underactuated spacecraft with two reaction wheels[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2017, 40(2): 320-332.
- [43] 刘刚, 李传江, 马广富. 应用非线性模型预测控制的绳系卫星 Halo 轨道保持控制[J]. *航空学报*, 2014, 35(9): 2605-2614. LIU Gang, LI Chuanjiang, MA Guangfu. Station-keeping of tethered satellite system around a Halo orbit using nonlinear model predictive control[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(9): 2605-2614.
- [44] 孙光, 霍伟. 卫星姿态直接自适应模糊预测控制[J]. *自动化学报*, 2010, 36(8): 1151-1159. SUN Guang, HUO Wei. Direct-adaptive fuzzy predictive control of satellite attitude[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2010, 36(8): 1151-1159.
- [45] 曹喜滨, 贺东雷. 编队构形保持模型预测控制方法研究[J]. *宇航学报*, 2008, 29(4): 1276-1283. CAO Xibin, HE Donglei. Research on the model predictive control approach for satellite formation keeping [J]. *Journal of Astronautics*, 2008, 29(4): 1276-1283.
- [46] BORRELLI F, BEMPORAD A, MORARI M. Predictive control for linear and hybrid systems[M]. London, UK: Cambridge University Press, 2017.
- [47] LIANG J, FULLMER R, CHEN Y Q. Time-optimal magnetic attitude control for small spacecraft [C]//Proceedings of 2004 43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC). Nassau, Bahamas: IEEE, 2004, 1: 255-260.
- [48] MENEGATTI D, GIUSEPPI A, PIETRABISSA A. Model predictive control for collision-free spacecraft formation with artificial potential functions[C]//Proceedings of 2022 30th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED). Vouliagmeni, Greece: IEEE, 2022: 564-570.
- [49] ESFAHANI N R, KHORASANI K. A distributed model predictive control (MPC) fault reconfiguration strategy for formation flying satellites[J]. *International Journal of Control*, 2016, 89(5): 960-983.
- [50] DI CAIRANO S, PARK H, KOLMANOVSKY I. Model predictive control approach for guidance of spacecraft rendezvous and proximity maneuvering[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2012, 22(12): 1398-1427.
- [51] 胡庆雷, 邵小东, 杨昊暘, 等. 航天器多约束姿态规划与控制: 进展与展望[J]. *航空学报*, 2022, 43(10): 403-431. HU Qinglei, SHAO Xiaodong, YANG Haoyang, et al. Spacecraft attitude planning and control under multiple constraints: Review and prospects[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(10): 403-431.
- [52] 胡庆雷, 解静洁, 奚勇. 基于拉盖尔函数的卫星姿态预测控制方法[J]. *飞控与探测*, 2019, 2(1): 1-7. HU Qinglei, XIE Jingjie, XI Yong. Method of the satellite attitude predictive control based on the laguerre function[J]. *Flight Control & Detection*, 2019, 2(1): 1-7.
- [53] 李翔. 可重复使用飞船再入制导方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2023. LI Xiang. Research on reentry guidance method of reusable spacecraft[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2023.
- [54] ZHANG X, LIU M, HU Q. Model predictive control for spacecraft attitude maneuver under actuators power limitation[C]//Proceedings of 2019 Chinese Control Conference (CCC). Guangzhou, China: IEEE, 2019: 8212-8217.
- [55] RICHARDS A, HOW J, SCHOUWENAARS T, et al. Plume avoidance maneuver planning using mixed integer linear programming[C]//Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibition. Montreal, Canada: AIAA, 2001.
- [56] 叶东, 张宗增, 吴限德. 有推力约束航天器交会的模型预测制导策略[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2017, 38(5): 759-765. YE Dong, ZHANG Zongzeng, WU Xiande. Model predictive based guidance strategy for spacecraft ren-

- dezvous with thrust constraints[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(5): 759-765.
- [57] 吴宝林, 曹喜滨. 基于模型预测的卫星编队队形机动控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2007(1): 218-223. WU Baolin, CAO Xibin. Satellite formation maneuver control using model predictive control[J]. Journal of Jilin University Engineering and Technology Edition, 2007(1): 218-223.
- [58] PARK H, DI CAIRANO S, KOLMANOVSKY I. Model predictive control for spacecraft rendezvous and docking with a rotating/tumbling platform and for debris avoidance[C]//Proceedings of the 2011 American Control Conference. San Francisco, USA: IEEE, 2011: 1922-1927.
- [59] CAMPO P J, MORARI M. Robust model predictive control[C]//Proceedings of 1987 American Control Conference. [S.l.]: IEEE, 1987: 1021-1026.
- [60] 谢澜涛, 谢磊, 苏宏业. 不确定系统的鲁棒与随机模型预测控制算法比较研究[J]. 自动化学报, 2017, 43(6): 969-992. XIE Lantao, XIE Lei, SU Hongye. A comparative study on algorithms of robust and stochastic MPC for uncertain systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(6): 969-992.
- [61] LIMON D, ALVARADO I, ALAMO T, et al. Robust tube-based MPC for tracking of constrained linear systems with additive disturbances[J]. Journal of Process Control, 2010, 20(3): 248-260.
- [62] KOLMANOVSKY I, GILBERT E G. Theory and computation of disturbance invariant sets for discrete-time linear systems[J]. Mathematical Problems in Engineering, 1998, 4(4): 317-367.
- [63] MAMMARELLA M, CAPELLO E, PARK H, et al. Spacecraft proximity operations via tube-based robust model predictive control with additive disturbances[C]//Proceedings of the 68th International Astronautical Congress. [S.l.]: International Astronautical Federation, 2017: 1-13.
- [64] MAMMARELLA M, CAPELLO E, PARK H, et al. Tube-based robust model predictive control for spacecraft proximity operations in the presence of persistent disturbance[J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 77: 585-594.
- [65] BUCKNER C, LAMPARIELLO R. Tube-based model predictive control for the approach maneuver of a spacecraft to a free-tumbling target satellite[C]//Proceedings of 2018 Annual American Control Conference (ACC). Milwaukee, USA: IEEE, 2018: 5690-5697.
- [66] DONG K, LUO J, DANG Z, et al. Tube-based robust output feedback model predictive control for autonomous rendezvous and docking with a tumbling target[J]. Advances in Space Research, 2020, 65(4): 1158-1181.
- [67] MIRSHAMS M, KHOSROJERDI M. Attitude control of an underactuated spacecraft using tube-based MPC approach[J]. Aerospace Science and Technology, 2016, 48: 140-145.
- [68] MIRSHAMS M, KHOSROJERDI M. Attitude control of an underactuated spacecraft using quaternion feedback regulator and tube-based MPC[J]. Acta Astronautica, 2017, 132: 143-149.
- [69] 管萍, 吴希岩, 戈新生. 基于Tube的挠性航天器模型预测姿态控制及主动振动控制[J]. 振动与冲击, 2022, 41(16): 261-270. GUAN Ping, WU Xiyan, GE Xinsheng. Tube-based model predictive attitude control and active vibration control for flexible spacecraft[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(16): 261-270.
- [70] 邹恒光, 宋继良, 王军政, 等. 卫星编队的管道模型预测控制方法研究[J]. 北京理工大学学报, 2021, 41(2): 201-206. ZOU Hengguang, SONG Jiliang, WANG Junzheng, et al. Satellite formation control strategy with tube-based MPC[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2021, 41(2): 201-206.
- [71] SCHWARM A T, NIKOLAOU M. Chance-constrained model predictive control[J]. AIChE Journal, 1999, 45(8): 1743-1752.
- [72] MAYNE D. Robust and stochastic model predictive control: Are we going in the right direction?[J]. Annual Reviews in Control, 2016, 41: 184-192.
- [73] MAMMARELLA M, LORENZEN M, CAPELLO E, et al. An offline-sampling SMPC framework with application to autonomous space maneuvers[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2018, 28(2): 388-402.
- [74] XU Y, YUAN Y, ZHOU D. The composite-disturbance-observer based stochastic model predictive control for spacecrafts under multi-source disturbances[J]. Journal of the Franklin Institute, 2021, 358(15): 7603-7627.
- [75] SANCHEZ J C, GAVILAN F, VAZQUEZ R. Chance-constrained model predictive control for near rectilinear halo orbit spacecraft rendezvous[J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 100(6): 105827.
- [76] 周旭艳, 涂海燕, 李彬. 基于随机模型预测控制的卫星编队重构[J]. 计算机仿真, 2023, 40(8): 87-94. ZHOU Xuyan, TU Haiyan, LI Bin. A stochastic model predictive control for reconfiguration of satellite formation[J]. Computer Simulation, 2023, 40(8): 87-94.
- [77] PARK H, ZAGARIS C, VIRGILI L J, et al. Analysis and experimentation of model predictive control for spacecraft rendezvous and proximity operations with multiple obstacle avoidance[C]//Proceedings of AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference. Long Beach, USA: AIAA, 2016: 5273.
- [78] ZAGARIS C, PARK H, VIRGILI L J, et al.

- Model predictive control of spacecraft relative motion with convexified keep-out-zone constraints[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2018, 41(9): 2054-2062.
- [79] JEWISON C, ERWIN R S, SAENZ-OTERO A. Model predictive control with ellipsoid obstacle constraints for spacecraft rendezvous[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2015, 48(9): 257-262.
- [80] SHANG X, ESKANDARIAN A. Emergency collision avoidance and mitigation using model predictive control and artificial potential function[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2023, 8(5): 3458-3472.
- [81] ZENG J, ZHANG B, SREENATH K. Safety-critical model predictive control with discrete-time control barrier function[C]//*Proceedings of 2021 American Control Conference (ACC)*. Orleans, USA: IEEE, 2021: 3882-3889.
- [82] BLANKE M, IZADI-ZAMANABADI R, BÖGH S A, et al. Fault-tolerant control systems—A holistic view[J]. *Control Engineering Practice*, 1997, 5(5): 693-702.
- [83] SHEN Q. Fault tolerant control for spacecraft attitude control systems[D]. Singapore: Nanyang Technological University, 2016.
- [84] HILL E. Model predictive control strategies for fault tolerance[D]. Ontario, Canada: University of Guelph, 2021.
- [85] PRAKASH J, NARASIMHAN S, PATWARDHAN S C. Integrating model based fault diagnosis with model predictive control[J]. *Industrial & engineering chemistry research*, 2005, 44(12): 4344-4360.
- [86] RAIMONDO D M, MARSEGLIA G R, BRAATZ R D, et al. Fault-tolerant model predictive control with active fault isolation[C]//*Proceedings of 2013 Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol)*. Nice, France: IEEE, 2013: 444-449.
- [87] CAMACHO E F, ALAMO T, DE LA PENA D M. Fault-tolerant model predictive control[C]//*Proceedings of 2010 IEEE 15th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2010)*. Bilbao, Spain: IEEE, 2010: 1-8.
- [88] GOPINATHAN M, BOSKOVIC J D, MEHRA R K, et al. A multiple model predictive scheme for fault-tolerant flight control design[C]//*Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control*. Tampa, USA: IEEE, 1998: 1376-1381.
- [89] KARGAR S M, SALAHSHOOR K, YAZDANPANA M J. Integrated nonlinear model predictive fault tolerant control and multiple model based fault detection and diagnosis[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2014, 92(2): 340-349.
- [90] KHAN R, WILLIAMS P, RISEBOROUGH P, et al. Fault detection and identification—A filter investigation[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2018, 28(5): 1852-1870.
- [91] ALESSIO A, BEMPORAD A. A survey on explicit model predictive control[J]. *Nonlinear Model Predictive Control: Towards New Challenging Applications*, 2009, 384: 345-369.
- [92] 曹鑫. 飞轮故障下微纳卫星显式模型预测控制方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2022.
- CAO Xin. Research on explicit model predictive control method of nanosat under flywheel fault[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2022.
- [93] 孙楚琦, 肖岩, 叶东, 等. 一种卫星姿轨一体化模型预测容错控制方法[J]. *宇航学报*, 2023, 44(6): 885-894.
- SUN Chuqi, XIAO Yan, YE Dong, et al. Fault-tolerant model predictive control of satellite pose integration via moving horizon estimation[J]. *Journal of Astronautics*, 2023, 44(6): 885-894.
- [94] HILL E, GADSDEN S A, BIGLARBEGLIAN M. Explicit nonlinear MPC for fault tolerance using interacting multiple models[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2021, 57(5): 2784-2794.
- [95] HILL E, NEWTON A, GADSDEN S A, et al. Tube-based robust model predictive control for fault tolerance[J]. *Mechatronics*, 2023, 95: 103051.
- [96] KHODAVERDIAN M, MALEKZADEH M. Fault-tolerant model predictive sliding mode control with fixed-time attitude stabilization and vibration suppression of flexible spacecraft[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2023, 139: 108381.
- [97] CAO X, GONG D, SHEN Q, et al. Fault-tolerant attitude control of spacecraft via explicit model prediction method[C]//*Proceedings of International Conference on Aerospace System Science and Engineering*. Singapore: Springer Nature, 2021: 147-161.
- [98] 赵桐, 管萍, 戈新生, 等. 基于自触发的大挠性航天器模型预测姿态控制[J]. *北京信息科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 37(2): 22-29.
- ZHAO Tong, GUAN Ping, GE Xinsheng, et al. Model predictive attitude control of large flexible spacecraft based on the self-triggered scheme[J]. *Journal of Beijing Information Science and Technology University*, 2022, 37(2): 22-29.
- [99] LOUEMBET C, GILZ P R A. Event-triggered model predictive control for spacecraft rendezvous[C]//*Proceedings of the 6th IFAC Conference on Nonlinear Model Predictive Control (NMPC 2018)*. [S.l.]: [s.n.], 2018.
- [100] BEMPORAD A, BARCELLI D. Decentralized model predictive control[J]. *Networked Control Systems*, 2010, 406: 149-178.
- [101] CHRISTOFIDES P D, SCATTOLINI R, DE LA PENA D M, et al. Distributed model predictive control: A tutorial review and future research directions

- [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2013, 51: 21-41.
- [102] MORGAN D, CHUNG S J, HADAEGH F Y. Model predictive control of swarms of spacecraft using sequential convex programming[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2014, 37(6): 1725-1740.
- [103] PIPPIA T, PREDA V, BENNANI S, et al. Reconfiguration of a satellite constellation in circular formation orbit with decentralized model predictive control [EB/OL]. (2022-01-25). <https://arxiv.org/abs/2201.10399>.
- [104] LAVAEI J, MOMENI A, AGHDAM A G. A model predictive decentralized control scheme with reduced communication requirement for spacecraft formation [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2008, 16(2): 268-278.
- [105] PEREIRA P, GUERREIRO B J, LOURENÇO P. Distributed model predictive control method for spacecraft formation flying in a leader-follower formation [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2022, 59(3): 3213-3223.
- [106] 张世杰, 段广仁. 分布式卫星编队飞行队形保持协同控制[J]. *宇航学报*, 2011, 32(10): 2140-2145.
ZHANG Shijie, DUAN Guangren. Cooperative control for distributed satellite formation keeping[J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 32(10): 2140-2145.
- [107] XING Y T, LOW K S, PHAM M D. Distributed model predictive control of satellite attitude using hybrid reaction wheels and magnetic actuators[C]//Proceedings of 2012 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications. Bandung, Indonesia: IEEE, 2012: 230-235.
- [108] WANG E, WU S, XUN G, et al. Active vibration suppression for large space structure assembly: A distributed adaptive model predictive control approach [J]. *Journal of Vibration and Control*, 2021, 27(3/4): 365-377.
- [109] 叶哲. 空间太阳能电站姿态动力学建模与分布式控制[D]. 大连: 大连理工大学, 2023.
YE Zhe. Attitude dynamics and distributed control of space solar power station[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2023.
- [110] HEGRENÆS Ø, GRAVDAHL J T, TØNDEL P. Spacecraft attitude control using explicit model predictive control[J]. *Automatica*, 2005, 41(12): 2107-2114.
- [111] LEOMANNI M, ROGERS E, GABRIEL S B. Explicit model predictive control approach for low-thrust spacecraft proximity operations[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2014, 37(6): 1780-1790.
- [112] 王槲华. 显式模型预测控制的研究及应用[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2009.
WANG Shuohua. Research and application of explicit model predictive control[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2009.
- [113] PERSSON S, VELDMAN S, BODIN P. PRISMA—A formation flying project in implementation phase[J]. *Acta Astronautica*, 2009, 65(9/10): 1360-1374.
- [114] BINET G, KRENN R, BEMPORAD A. Model predictive control applications for planetary rovers[C]//Proceedings of the 11th International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics in Space.[S.l.]: [s.n.], 2012: 4-6.
- [115] SAPONARA M, PHILIPPE C, TRAMUTOLA A. Model predictive control real time performance in a rendezvous & capture scenario for Mars Sample & Return [C]//Proceedings of the 5th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS). [S.l.]: [s.n.], 2013.
- [116] BUYUKKOCAK A T, AKSARAY D, YAZICIOĞLU Y. Distributed planning of multi-agent systems with coupled temporal logic specification[C]//Proceedings of AIAA Scitech 2021 Forum. [S.l.]: AIAA, 2021: 1123.
- [117] ZHOU X, ZOU Y, LI S, et al. Distributed receding horizon control for multi-agent systems with conflicting signal temporal logic tasks[C]//Proceedings of 2020 2nd International Conference on Industrial Artificial Intelligence (IAI). Shenyang, China: IEEE, 2020: 1-6.
- [118] 康国华, 金晨迪, 郭玉洁, 等. 基于深度学习的组合体航天器模型预测控制[J]. *宇航学报*, 2019, 40(11): 1322-1331.
KANG Guohua, JIN Chendi, GUO Yujie, et al. Model predictive control of combined spacecraft based on deep learning[J]. *Journal of Astronautics*, 2019, 40(11): 1322-1331.
- [119] SILVESTRINI S, LAVAGNA M. Neural-based predictive control for safe autonomous spacecraft relative maneuvers[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2021, 44(12): 2303-2310.
- [120] ELKINS J G, SOOD R, RUMPF C. Autonomous spacecraft attitude control using deep reinforcement learning[C]//Proceedings of the 71st International Astronautical Congress. [S.l.]: [s.n.], 2020: 1-14.

(编辑:张蓓)