

敏捷卫星时间最优姿态机动研究综述*

宝音贺西[†] 印明威

(清华大学 航天航空学院, 北京 100084)

摘要 敏捷卫星是新一代的对地观测卫星, 凭借其出色的机动性能带来了巨大的军事利益与商业利益. 它最大的优势是具有快速姿态机动的能力, 其研究的重点之一也正是快速姿态机动问题, 需要通过优化来获得最短时间的姿态机动策略. 本文围绕敏捷卫星的时间最优姿态机动问题, 分别从时间最优姿态机动的优化求解和时间最优解的特性两个方面对该问题的研究现状进行了综述.)

关键词 敏捷卫星, 时间最优, bang-bang 控制, 奇异最优控制

DOI: 10.6052/1672-6553-2020-057

引言

从“天圆地方”的远古传说一直到现代诗人的“背负青天朝下看, 都是人间城郭”, 这些都反应了自古以来人们对俯瞰地球、一窥全貌的向往. 人们期待对地球有着更为全面的观测, 对自己赖以生存的这个星球有着更为深刻的了解.

随着现代科技的发展, 人们通过对地观测卫星 (Earth Observing Satellite) 实现了这一愿望. 1972 年, 美国率先发起了对地观测卫星项目“陆地卫星” (Landsat Program)^[1], 并于同年发射了该项目的第一颗卫星——陆地卫星 1 号 (Landsat-1)^[2]. 该卫星服役后, 便立下赫赫战功, 累计传回了超过 30 万张图像, 对地质勘测、地图绘制等都做出了重大贡献, 甚至还在加拿大东海岸 20 km 处发现了一处无人岛. 初尝胜果后, 该项目又在 1977 年至 1984 年期间连续发射了 4 颗对地观测卫星, 依次为陆地卫星 2 号至 5 号^[3-6], 成为了当时为世界各国提供遥感数据的主要卫星系统. 在其影响下, 世界各国掀起了一波研制对地观测卫星的浪潮, 法国于 1978 年开始研制并相继发展了 SPOT 系列^[7]对地观测卫星, 日本于 1987 年发射了 MOS-1^[8]对地观测卫星, 我国在 70 年代后期也开始了对地观测卫星的研制. 在这一良好势头下, 美国于 80 年代规划了一项规模宏大的对地观测系统 (Earth Observing System, EOS)^[9]计划, 他们提出要构建一套对地球进行综合

性观测的系统, 涉及陆地、海洋、大气等诸多方面. 至此, 全球各国相继开始构建各自的对地观测系统, 我国也逐步推进了“资源”系列^[10]、“海洋”系列^[11]等对地观测卫星的研制. 这些对地观测卫星较好地满足了人们对地观测的愿望, 但它们也存在不足之处, 那就是机动能力有限, 它们大都只能在飞越地面目标时进行被动观测, 比如法国的 SPOT-5^[12]卫星就只有一个自由度.

在 20 世纪 90 年代末期, 随着新一代敏捷对地观测卫星 (Agile Earth Observing Satellite, AEOS) 的出现, 该领域的研究进入了新的阶段. 新一代的敏捷对地观测卫星, 又叫敏捷成像卫星, 简称敏捷卫星, 它可以沿滚转、俯仰和偏航 3 个方向进行机动^[13]. 相较传统卫星而言, 敏捷卫星的姿态机动速度提高了将近 1 个量级^[14], 对地观测的能力大大加强. 可以实现对地面多个点目标、长条带目标、区域目标进行成像观测^[15] (图 1), 甚至可以实现对地凝视观测. 再加上高分辨率星载相机的发展, 敏捷卫星带来了巨大的军事利益与商业利益.

美国、法国等国家竞相发射了各自的敏捷卫星 (图 2). 1999 年 9 月, 美国在范登堡空军基地成功发射了敏捷卫星 Ikonos-2^[16], 该卫星是世界上首颗分辨率优于 1 米的商业遥感卫星. 在 2000 年 1 月 1 日新千年之际, Ikonos-2 卫星获得的影像数据开始商业运营, 大获成功, 并于同年进入我国市场, 对我国数字城市的建设起到了很大的推动作用. 从 2001

2019-09-25 收到第 1 稿, 2019-11-30 收到修改稿.

* 国家杰出青年科学基金资助项目 (11525208)

[†] 通讯作者 E-mail: baoyin@tsinghua.edu.cn

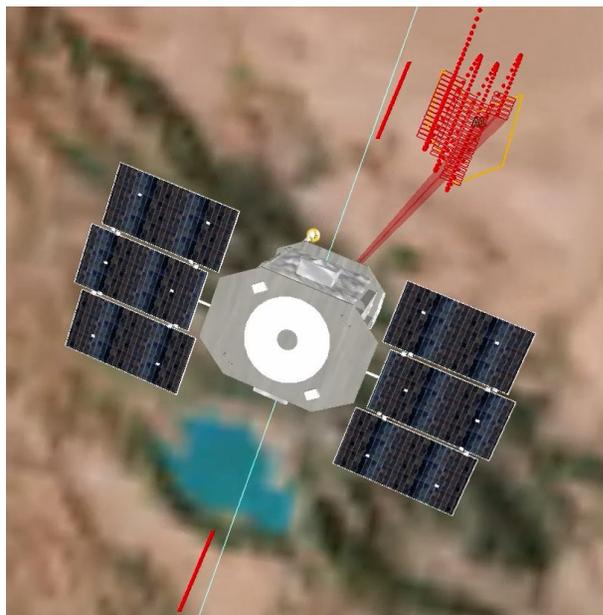


图1 敏捷卫星对地面区域目标成像

Fig. 1 Agile satellite imaging for the regional target

年开始,法国也发起了敏捷卫星项目昴宿星(Pleiades)^[17]工程.该工程由两颗敏捷卫星Pleiades-A和Pleiades-B组成,分别于2011年和2012年发射成功,两颗卫星在同一个太阳同步轨道,相位相差180°,能在25秒内将卫星姿态调整60°.2006年,以色列发射了敏捷卫星EROS-B^[18].2007年,印度发射了敏捷卫星Cartosat-2^[19].美国也陆续发射了QuickBird-2^[20]、GeoEye-1^[21]、Worldview^[22]系列敏捷卫星,形成了比较成熟的产

业链.

目前,我国的传统对地观测卫星发展已趋于成熟,有了“资源”系列、“海洋”系列等对地观测卫星,但敏捷卫星等高性能对地观测卫星的发展相对滞后.为此,我国于2006年发起了高分辨率对地观测系统重大专项^[23](简称高分专项),并将其列入了《国家中长期科学与技术发展规划纲要(2006-2020年)》.自2013年起,我国陆续发射了高分一号^[24]至高分六号、高景一号(SuperView-1)^[25]等一系列对地观测卫星.这些卫星的性能相较传统卫星都有了大幅提升,特别是2016年起发射的高景一号系列卫星已经是真正意义上的敏捷卫星了,可以实现多种模式成像.

尽管如此,我国与世界发达国家仍存在较大差距.截止2018年底,国外在轨运行的对地观测卫星共有601颗,美国占据了其中的66%^[26].这些卫星都产生了巨大的经济效益,美国卫星产业协会2018年发布的《卫星状况报告》^[27]显示,目前全球卫星对地观测业务的年收入已达到22亿美元.而我国对地观测服务的产业化尚处于萌芽阶段,敏捷卫星的发展也才刚刚起步.

在我国推动高端产业发展的新时期^[28],敏捷卫星的研究是关系到国计民生的重要课题.一方面,敏捷卫星可以用于军事侦察,实现对地面全天候的监测,配合地面武装形成海陆空天的立体防御体系,有助于提升我国的国防力量;另一方面,敏捷卫



图2 国内外已发射的主要敏捷卫星

Fig. 2 Major agile satellites launched at home and abroad

星可以用于地质勘探、海洋监测、地图测绘、城市管理等诸多民用领域,对于改善人民生活、推动航天产业的发展具有重要意义.目前学术界关于敏捷卫星的研究主要聚焦在两个层面的问题:

(1)宏观层面的成像任务规划问题^[29].在宏观层面,需要对敏捷卫星的成像任务进行规划调度,使得在满足各种约束条件的情况下,充分利用敏捷卫星优势,以最优状态完成任务目标.由于涉及的约束种类繁多,需要考虑的空间和时间范围相比传统卫星都呈现爆炸性增长,导致该问题的求解异常困难.根据对地观测目标的不同,目前对该问题的研究可分为单点目标立体成像^[30]、多点目标成像^[31]、长条带目标成像^[32]和区域目标成像^[33]这4大类.针对这些问题,学者们对局部搜索算法^[34]、遗传算法^[35]、聚类算法^[36]、禁忌搜索算法^[37]等诸多求解算法进行了研究,并取得了不错的成果,但目前对于多个敏捷卫星组网以及复杂任务情况下的建模与求解还存在难度,任务规模变大后,求解效率就会显得不是很理想.

(2)微观层面的时间最优姿态机动问题^[38,39].在微观层面,成像任务规划好之后,执行成像任务时,卫星在不同目标之间的切换以及姿态的调整都会涉及到时间最优姿态机动的问题.也就是在满足各种约束条件的情况下,通过优化获得最短时间的姿态机动策略^[40].围绕这一问题,学者们对时间最优姿态机动的求解^[41]、时间最优解的特性^[42]等诸多方面^[43,44]均进行了研究,也取得了很多阶段性成果.

本文围绕微观层面的时间最优姿态机动问题,从时间最优姿态机动的优化求解和时间最优解的特性两个方面对该问题的研究现状进行了介绍.

1 时间最优姿态机动的优化求解

敏捷卫星时间最优姿态机动问题是一个典型的最优控制问题.该问题的实质是通过优化控制量,使得敏捷卫星从一个姿态机动到另一个姿态的时间最短.本文选取的研究对象为三轴机动的刚体敏捷卫星^[42],主要考虑起止角速度为零的情况,问题的性能指标为机动时间,控制量为作用于三个中心惯量主轴上的控制力矩,控制允许集为闭集,状态方程则由欧拉旋转方程和卫星的运动学方程构成.由于该问题的强非线性,目前仍然无法得出解析解,所以主要依靠数值方法进行求解.求解该问

题的优化算法主要包括间接法^[45]和直接法^[46].

1.1 间接法

间接法的求解思路是通过极大值原理来间接获取问题的最优解^[47].根据极大值原理^[48],可以得出该问题最优解的一阶必要条件,从而将原姿态机动的优化问题转化为一个两点边值问题(Two-Point Boundary Value Problem, TPBVP),然后利用打靶法对两点边值问题进行优化求解^[49,50].Bilimoria和Wie^[42]就是利用该方法对卫星的时间最优姿态机动进行求解,获得了球对称情况下卫星机动180°的时间最优解.尽管该方法可以获得准确的时间最优解,但由于姿态机动的最优控制通常为bang-bang控制,是一种间断不连续的形式,导致利用打靶法求解时,出现了初值敏感的问题,初值收敛域很小^[51].如果将搜索初值的过程考虑在内,整体求解效率并不高.

一类解决初值敏感问题的思路就是通过辅助性办法降低初值猜测的难度^[52].一方面,初值猜测的难点主要是因为初值所涉及的协态变量往往没有明确的物理意义^[53],无法将初值猜测控制在合理的区间,而盲目猜出合理值的概率又很低.基于此,蒋方华等^[54]提出了一种协态归一化技术,将协态变量猜测的范围从无穷域缩小到了一个高维单位球面上,大大缩小了猜测范围,从而降低了初值猜测的难度.另一方面,由于造成初值敏感的原因主要是最优控制间断不连续^[51],那么是否可以将时间最优姿态机动问题转为一个简单易求解的连续问题,然后向原问题过渡呢?为此,另一种重要的处理方式就是采用同伦技术^[55,56]进行平滑过渡.2002年,Bertrand和Epony^[57]提出了一种平滑技术,该技术就是Haberkorn等人^[55]所提及的同伦技术.同伦技术本质上是一种数值延拓的思想,Bertrand和Epony^[57]利用同伦参数将原问题和与之相关的一个简单问题进行关联,通常简单问题的最优解是连续的,引入同伦参数序列,从简单问题出发,将前一次优化计算的结果作为下一次优化计算的初值,不断迭代,最终趋于原问题时,就能获得一个较好的初值.Li^[51]通过同伦技术与打靶法结合,对非对称情况的时间最优姿态机动进行了求解,取得了不错的效果.此外,Martell^[58]、Seywald^[59]、Yan^[60]等诸多学者提出了一系列降低初值猜测难度的方法.以上方法针对特定的问题都具有一定的适用性,降低了初值猜测的难度,对时间最优姿态机动的求解也发

挥了重要作用.但由于姿态机动问题本身的非连续性,利用打靶法求解所出现的初值敏感问题难以回避,进行大规模的数值研究时,求解效率仍然比较有限.

另一类解决初值敏感问题的思路就是绕开打靶法从根本上予以回避.既然利用打靶法求解容易出现初值敏感困难,就有学者考虑到采用其他数值方法来对两点边值问题进行求解,他们将状态方程和协态方程进行离散,然后利用非线性规划的方法对该问题进行优化求解^[61]. Kluever^[62,63]、高扬等^[64]学者都对这种求解思路进行了研究,他们将该方法称为混合法^[65].混合法既利用协态方程保证了最优性,又利用非线性规划规避了初值敏感问题,在实际使用中取得了很好的效果.2009年,德州农工大学的 Bai 和 Junkins^[66]利用混合法对球对称情况的时间最优姿态进行了求解,她们的结果表明该方法具有较好的收敛效果,而且她们还发现了新的局部最优解,甚至比 Bilimoria 和 Wie^[42]利用打靶法求得的解更优一点.值得一提的是,由于该方法的特殊性,有的学者也将混合法与间接法区分开,认为混合法是区别于间接法和直接法的单独一类方法^[54].

综上所述可以看出,间接法是求解时间最优姿态机动的一种可行方法,其求得的结果一旦收敛,往往具有很好的最优性.该方法的不足之处就是初值敏感问题,如果把搜索初值的过程考虑进来,大量求解时可能效果不太理想.对于需要考虑角速度约束的情况,其求解效率也会受到影响.此外,当最优解为奇异最优控制时,直接利用间接法进行求解也不太适合,需要进行一些特殊处理^[67].

1.2 直接法

直接法的思路是将姿态机动问题离散成一个参数优化问题直接优化求解^[68].直接法的处理方式通常是引入时间节点,将连续的优化问题转化成离散形式,通过对离散节点上的控制量和状态量进行插值来表示连续的控制量和状态量,整个优化问题就变成了对节点上待求量的非线性规划求解问题,然后利用序列二次规划算法^[69]等非线性规划求解方法对该问题进行求解.根据离散过程数值积分方法的不同,直接法大致可以分为基于有限差分或数值积分的局部近似和基于 Lagrange 插值的全局近似两类^[52].

局部近似的直接法根据优化变量不同主要可以分为配点法 (Collocation)^[46]、微分包含法

(Differential Inclusion)^[70]和直接打靶法^[71]等.配点法又叫直接变换法^[72],该方法对控制变量和状态变量均进行离散,通过优化使得节点上的控制量和状态量既满足约束条件,同时又使性能指标最优.在配点法中,控制变量和状态变量都是优化变量^[46]. Coverstone 等人^[70]提出的微分包含法则不同,他们通过处理,消去了控制变量,优化变量仅有离散的状态变量. Hull 等人^[71]采用的方法又与微分包含法相反,他们的优化变量仅有控制变量,采用数值积分的方式进行求解,他们称之为数值积分法.该方法的求解思路与打靶法类似,所以学者郭铁丁^[52]也称其为直接打靶法.这几种方法大都基于有限差分或数值积分来将微分方程转换为代数方程,对离散子段进行了局部近似. Scrivener^[73]采用了直接法中的配点法对球对称情况的时间最优姿态机动进行了求解,将机动时间进行了等距离离散,在机动角度大于 10° 的情况下,他们获得的结果与 Bilimoria 和 Wie^[42]的研究结果一致.相比间接法而言,该类方法具有较宽的数值收敛域,而且容易实施,适合处理姿态机动过程中的角速度约束等各种限制,也适用于处理奇异最优控制.但它们无法给出协态变量等信息,不能通过一阶必要条件来保证结果的最优性.如果想要获得比较准确的最优解,就不得不提高离散的规模,这样带来的矛盾之处就是计算量比较大,增加了非线性规划的难度^[54].

全局近似的直接法中最常用的就是基于 Lagrange 插值的伪谱法^[74].伪谱法对离散节点上的控制量和状态量进行 Lagrange 插值,利用插值多项式对整个时间区间进行全局近似,然后利用非线性规划方法优化求解.本质上伪谱法也是配点法的一种,该方法比较特别的地方在于离散节点的选取,它们通常取为 Gauss 积分点^[75].构造 Gauss 积分点的方式不同,伪谱法的格式也会有所差别,常用的几种格式有 Legendre-Gauss-Radau (LGR)^[76]、Legendre-Gauss (LG)^[77]、Legendre-Gauss-Lobatto (LGL)^[78]等,它们的边界节点数不同,但本质上都是对问题的全局近似.对 Gauss 积分点构成的插值多项式进行微分,可以得到相应的微分矩阵,通过微分矩阵就可以把原来的微分方程转化为代数方程,原问题就变成了一个相对更易求解的非线性规划问题. Fahroo 等^[79,80]诸多学者的研究表明,伪谱法有一个非常重要的理论优势,它的一阶必要条件 Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 条件与极大值原理所

推导的一阶必要条件等价(离散形式),Fahroo等^[79]称之为乘子等价映射.通过乘子等价映射,可以从理论上保证伪谱法结果的最优性,而且可以对间接法中的协态变量进行估计.Li^[81]利用 Legendre-Gauss-Radau 伪谱法对球对称情况下的时间最优姿态机动进行了求解,验证了 Bilimoria^[42]以及 Bai^[66]等人之前的研究成果.Li和 Xi^[82]还尝试了利用伪谱法给间接法提供协态变量的初值,然后再利用间接法对时间最优姿态机动求解,这样便降低了初值猜测的难度,最终结果表明该求解思路的效果不错.伪谱法具有直接法收敛域宽的优势,适合处理各种约束以及奇异最优控制问题,而且利用乘子等价映射能较好地保证结果的最优性.目前伪谱法得到了行业内的广泛认可,并有学者开发了相关的软件包,比如 DIDO^[83]、GPOPS^[84]等.不过伪谱法由于本质上采取的是全局近似,比较适合于处理光滑连续的问题,而时间最优姿态机动的最优解通常是不连续的 bang-bang 控制,面对大量的工程算例时,仍会出现许多求解效率低下的情况^[85].为此, Ross^[86]、Darby^[87]等学者提出了带结伪谱法(Pseudospectral Knotting Method)、hp 自适应伪谱法等一系列的方法,来改善伪谱法的求解效率.

除了上述典型的间接法和直接法外,还有学者提出了一些其他方案对时间最优姿态机动进行求解.Li和 Bainum^[88]提出了一种结合极大值原理和拟线性化技巧的求解方法.Byers和 Vadali^[89]利用切换时间优化(Switching Time Optimization, STO)^[90]算法进行了求解.Fleming等^[91]利用 Carathéodory- π 方法进行了求解.Boyarko等^[92]则提出了虚拟时域的逆动力学方法进行求解.这些方法对求解时间最优姿态机动的研究都具有重要意义.

2 姿态机动时间最优解的特性

研究姿态机动时间最优解的特性有助于了解最优控制的本质,提高优化求解的效率.截止目前,对于三轴机动的刚体敏捷卫星,仍然无法获得时间最优姿态机动的解析解^[81],因而只能通过数值方法进行求解.为了对时间最优解的结构及本质有更深的了解,促进数值优化方法的效率提升,学者们对时间最优解的特性进行了大量研究^[93],主要体现在对最优控制特性与最优时间范围的探讨.因为姿态机动的最优控制有 bang-bang 控制和奇异最优控制两种可能^[42],所以下面分别对 bang-bang 控

制、奇异最优控制和最优时间范围三个部分的研究现状分别进行介绍.

2.1 bang-bang 控制

三轴姿态机动的时间最优解通常为 bang-bang 控制,对 bang-bang 控制特性的研究主要集中在控制量的切换次数^[94].早期,由于欧拉旋转机动路径最短^[95],也最直观,学者们^[88]认为时间最优解很可能是欧拉旋转,或者在欧拉旋转解附近,因此,他们对如何求得欧拉旋转下的时间最优进行较多研究.Li和 Bainum^[88]基于此,提出了一种拟线性化的方法,对时间最优姿态机动进行求解.1993年, Bilimoria和 Wie^[42]对球对称卫星的姿态机动进行了研究,他们利用间接法对卫星绕惯量主轴的姿态机动优化求解,结果表明,欧拉旋转通常不是姿态机动的最优解,而是三轴机动的 bang-bang 控制.当绕惯量主轴的机动角度小于 72° 时, bang-bang 控制各分量的总切换次数是 7 次,而当机动角度大于 72° 时,切换次数是 5 次.该结果引起了广泛关注,并成为了这一问题研究的标杆.同年, Byers和 Vadali^[89]利用切换时间优化算法求解了该问题的近似解,他们认为 bang-bang 控制的切换次数通常为 5 次.之后, Scrivener等^[73]利用配点法对该问题进行了研究,结果显示,当机动角度大于 10° 时, bang-bang 控制的切换次数与 bilimoria和 Wie^[42]的结果一致,而当机动角度小于 10° 时,出现了不同的切换次数,他们猜想这可能是因为他们的方法不适用于小角度机动的情况.2009年,各种数值方法快速发展,计算机性能也大幅提升, Bai和 Junkins^[66]又利用混合法对球对称卫星的时间最优姿态机动进行了研究,这一次她们发现了新的结果.结果表明,当绕主轴机动的角度大于 72° 时,切换次数确实为 5 次,而当机动角度小于 72° 时,最优控制的切换次数为 6 次.该结果刷新了 Bilimoria和 Wie^[42]的解,是该问题的又一标志性成果.此外,她们证明了当控制力矩矢量的幅值一定而方向任意时,欧拉旋转是姿态机动的最优解.2017年, Li^[81]利用伪谱法对该问题重新进行了计算,再次确认了 Bai和 Junkins^[66]研究结果的正确性.以上研究对球对称卫星的姿态机动具有重要意义,有助于提升 STO^[90]等数值算法的求解效率.这些研究主要集中在球对称卫星绕惯性系 Z 轴的姿态机动,在此基础上, Yin^[96]等人对球对称以及非对称卫星绕任意方向机动的特性均进行了研究,其结果表明,最优控制为

bang-bang控制时的切换次数通常为5次或6次。

2.2 奇异最优控制

奇异最优控制^[97]也是时间最优姿态机动的一种可能解。利用极大值原理求解最优控制时,根据开关函数的正负来判断最优控制分量的取值,当开关函数在某一段时间恒为零时,最优控制分量无法简单判断,此时就称之为奇异控制。早在1920年^[98],关于奇异最优控制的探讨便已萌芽,甚至在有的算例中,奇异控制是最优控制的唯一解^[97],因此不能忽视。1993年,对于三轴机动的球对称卫星,Bilimoria和Wie^[42]对最优控制的可能结果进行了严格的解析推导,他们得出最优控制可能有四种情况:bang-bang控制、1个控制分量奇异、2个控制分量奇异和3个控制分量奇异。经过研究,他们给出了bang-bang控制为最优控制的算例,排除了3个控制分量奇异的可能性,但对于1个或2个控制分量奇异的情况既没能予以排除,也没有给出相关算例。同年,Seywald和Kumar^[97]针对球对称卫星的奇异最优控制进行了深入研究,他们将边界条件拓展到了起止角速度任意的情况,结果表明,在起止角速度任意的情况,同样不可能出现3个控制分量奇异的情况。对于1个或2个控制分量奇异的情况,他们从协态变量的角度给出了有穷阶奇异和无穷阶奇异的必要条件,证明了绕惯量主轴机动时,欧拉旋转不是最优控制。这些结果为之后的研究奠定了基础,但对于球对称卫星的奇异最优控制仍无法给出明确结论。1999年,Shen和Tsiotras^[99]以非对称卫星为研究对象,对只有两个控制力矩作用下的奇异最优控制进行了研究,他们的研究方式与Seywald和Kumar^[97]类似,结果表明对于只有两个控制力矩作用的情况,奇异最优控制解是可能的。之后, Lee^[100]、Fleming^[91]等学者也对三轴姿态机动的奇异最优控制进行了一些讨论,结果与之前的研究类似。2018年,印明威等^[101]利用解析推导的方式,排除了球对称情况奇异控制为最优控制的可能性,严格地证明了起止状态静止时球对称情况的最优控制一定是bang-bang控制,此外,他们的最新研究^[96]表明,对于非对称情况存在最优解为奇异控制的可能。

2.3 最优时间范围

由于无法以解析形式直接给出最优时间,为了工程实用方便,学者们试图以解析形式给出最优时间的范围。2010年,Fleming^[91]等在不考虑角速度约

束的情况下,基于欧拉旋转定理,分别以最大作用力矩、最小转动惯量和最小作用力矩、最大转动惯量对最优时间的范围进行估计。2016年,King等^[102]对角速度约束进行考虑,与Fleming等^[91]的研究思路一致,他们基于欧拉旋转定理,对受角速度约束情况下的最优时间范围进行了估计。他们的估计方法简单实用,对工程研究具有积极意义,不过估计方式偏于保守,导致有些情况估计的上下限偏离真实值太远。2019年,Yin等^[96]通过找寻姿态机动的可行解,对最优时间范围的估计进行了修正,给出了一个比较准确的范围估计。

3 结束语

时间最优姿态机动问题因为关系到敏捷卫星的工作性能而备受关注,本文综述了求解时间最优姿态机动的优化算法以及最优解的特性。这些优化算法总体可分为间接法和直接法两大类,各有优劣。最优解的bang-bang控制和奇异最优控制存在一些规律特性,姿态机动的最优时间也可以给出一个比较准确的解析范围。

展望未来,由于敏捷卫星具有出色的机动性能,可以完成很多传统卫星所无法完成的任务,其在21世纪的发展必定大放异彩。尽管目前的研究取得了一些进展,但仍存在许多未知的问题亟待解决,现列举如下:

(1) 时间最优姿态机动的解析解研究。尽管目前对时间最优姿态机动的数值求解方法很多,但每种数值方法均有其局限性,也并不能保证在所有情况下都具有很好的求解效率。如果能在解析结果的研究上取得进展,将可以极大地提高该问题的求解效率,促进自主敏捷卫星的发展,推动时间最优姿态机动在各工程领域的应用。

(2) 路径约束情况下的时间最优姿态机动研究。工程实践中,有的星上载荷需要避免阳光直射,有的载荷为了通信而对其天线朝向有所限制,这些要求都构成了卫星姿态机动过程中的路径约束。为此,国外近几年已开始了对路径约束情况下的姿态机动研究,该研究对完善时间最优姿态机动问题的理论体系具有重要意义。

(3) 起始和末端均为运动状态的时间最优姿态机动研究。目前对姿态机动问题的研究主要集中于起止均为静止状态的情况,也就是说起止角速度均为零,而敏捷卫星在对地观测过程中往往面对多个

成像目标,倘若可以实现从运动状态到运动状态的时间最优控制,那么将可以进一步提高敏捷卫星的工作效率,带来更大的军事与商业利益.

(4)柔性敏捷卫星的时间最优姿态机动研究.本文及许多学者的研究重点集中于刚体敏捷卫星的研究,而实际中并不存在绝对的刚体,很多卫星都具有柔性部件,比如太阳能帆板等,这就导致卫星在快速机动过程中会面临振动等一系列复杂问题.因此有必要对柔性情况下的时间最优姿态机动进行研究,综合平衡机动效率与振动等多项因素.

参 考 文 献

- Woodcock C E, Allen R, Anderson M, et al. Free access to Landsat imagery. *Science*, 2008, 320 (5879): 1011~1011
- Chander G, Markham B L, Helder D L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(5):893~903
- Barrett E C, Grant C K. Relations between frequency distributions of cloud over the United Kingdom based on conventional observations and imagery from LANDSAT 2. *Weather*, 1979, 34(11):416~424
- Ormsby J P. The use of Landsat-3 thermal data to help differentiate land covers. *Remote Sensing of Environment*, 1982, 12(2):97~105
- Malila W A, Metzler M D, Rice D P, et al. Characterization of Landsat-4 MSS and TM digital image data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1984 (3):177~191
- Chander G, Markham B. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(11):2674~2677
- Jones A R, Settle J J, Wyatt B K. Use of digital terrain data in the interpretation of SPOT-1 HRV multispectral imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 1988, 9(4):669~682
- Ishiguro E, Kumar M K, Hidaka Y, et al. Use of rice response characteristics in area estimation by LANDSAT/TM and MOS-1 satellites data. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 1993, 48(1):26~32
- Kaufman Y J, Herring D D, Ranson K J, et al. Earth observing system AM1 mission to earth. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(4):1045~1055
- 陈宜元. 中巴地球资源卫星. *航天器工程*, 2002, 3(2):1~9 (Chen Y Y. China-Brazil earth resources satellite. *Spacecraft Engineering*, 2002, 3(2):1~9 (in Chinese))
- 蒋兴伟. 我国海洋卫星系列的发展及其应用展望. *中国航天*, 2001(9):13~17 (Jiang X W. Development of China's marine satellite series and their application prospects. *Aerospace China*, 2001(9):13~17 (in Chinese))
- Feng X L, Wang K, Lou L M. Application of remotely sensed image of SPOT5 to land use change survey. *Journal of Zhejiang University*, 2005
- Lemaître M, Verfaillie G, Jouhaud F, et al. Selecting and scheduling observations of agile satellites. *Aerospace Science and Technology*, 2002, 6(5):367~381
- 蔡晓晓. 敏捷小卫星姿态控制方法研究 [硕士学位论文]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013 (Cai X X. Research on attitude control method of small agile satellite [Master Thesis]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013 (in Chinese))
- 李志亮, 李小将, 王志恒. 敏捷卫星任务规划问题研究现状与展望. *装备学院学报*, 2016(1):69~75 (Li Z L, Li X J, Wang Z H. Current status and prospect of agile satellite mission planning. *Journal of Equipment Academy*, 2016(1):69~75 (in Chinese))
- Sande C J V D, Jong S M D, Roo A P J D. A segmentation and classification approach of IKONOS-2 imagery for land cover mapping to assist flood risk and flood damage assessment. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 2003, 4(3):217~229
- Gleyzes M A, Perret L, Kubik P. Pleiades system architecture and main performances. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012, 39(1):537~542
- Levin N, Johansen K, Hacker J M, et al. A new source for high spatial resolution night time images—The EROS-B commercial satellite. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 149: 1~12
- Martha T R, Reddy P S, Bhatt C M, et al. Debris volume estimation and monitoring of Phuktal river landslide-dammed lake in the Zaskar Himalayas, India using Cartosat-2 images. *Landslides*, 2017, 14(1):373~383
- Gómez C, Wulder M A, Montes F, et al. Modeling forest structural parameters in the Mediterranean pines of central Spain using QuickBird-2 imagery and classification and regression tree analysis (CART). *Remote Sensing*, 2012, 4(1):135~159
- Huang X, Zhang L. A multidirectional and multiscale morphological index for automatic building extraction from multispectral GeoEye-1 imagery. *Photogrammetric*

- Engineering & Remote Sensing*, 2011, 77(7):721~732
- 22 Immitzer M, Atzberger C, Koukal T. Tree species classification with random forest using very high spatial resolution 8-band WorldView-2 satellite data. *Remote Sensing*, 2012, 4(9): 2661~2693
 - 23 童旭东. 中国高分辨率对地观测系统重大专项建设进展. 遥感学报, 2016, 20(5):775~780(Tong X D. Development of China high-resolution earth observation system. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 775~780 (in Chinese))
 - 24 白照广. 高分一号卫星的技术特点. 中国航天, 2013(8): 5~9 (Bai Z G. Technical characteristics of the Gaofen-1 satellite. *Aerospace China*, 2013(8): 5~9 (in Chinese))
 - 25 赵迎龙, 瞭望. 高景一号商业遥感卫星成功发射. 航天器工程, 2017(26):145(Zhao Y L, Liao W. SuperView-1 commercial remote sensing satellite successfully launched. *Spacecraft Engineering*, 2017(26):145(in Chinese))
 - 26 龚燃, 刘韬. 2018年国外对地观测卫星发展综述. 国际太空, 2019(2): 48~55 (Gong R, Liu T. A summary of the development of foreign earth observation satellites in 2018. *Space International*, 2019(2):48~55(in Chinese))
 - 27 孙雪松. 2018年卫星产业状况报告. 卫星应用, 2018, 80(8): 65~66(Sun X S. State of the satellite industry report in 2018. *Satellite Application*, 2018, 80(8): 65~66 (in Chinese))
 - 28 栾恩杰, 王崑声, 袁建华, 等. 我国卫星及应用产业发展研究. 中国工程科学, 2016, 18(4): 76~82(Luan E J, Wang K S, Yuan J H, et al. Research on satellite application industry development in china. *Strategic Study of CAE*, 2016, 18(4):76~82(in Chinese))
 - 29 向仍湘. 敏捷卫星任务调度技术研究[硕士论文]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010(Xiang R X. Research on selecting and scheduling observations of agile satellites [Master Thesis]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010(in Chinese))
 - 30 Toutin T. Comparison of stereo-extracted DTM from different high-resolution sensors: SPOT-5, EROS-A, IKONOS-II, and QuickBird. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(10):2121~2129
 - 31 张新伟, 戴君, 刘付强. 敏捷遥感卫星工作模式研究. 航天器工程, 2011, 20(4): 32~38(Zhang X W, Dai J, Liu F Q. Research on working mode of remote sensing satellite with agile attitude control. *Spacecraft Engineering*, 2011, 20(4):32~38(in Chinese))
 - 32 黄群东, 杨芳, 赵键. 敏捷卫星宽幅动态成像姿态调整技术研究. 航天器工程, 2013, 22(4):17~22(Huang Q D, Yang F, Zhao J. Research on attitude guidance technology for agile satellite wide regional dynamic imaging. *Spacecraft Engineering*, 2013, 22(4): 17~22 (in Chinese))
 - 33 阮启明. 面向区域目标的成像侦察卫星调度问题研究[博士论文]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006(Ruan Q M. Research on photo-reconnaissance satellite scheduling problem for area targets observation [Ph.D Thesis]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006(in Chinese))
 - 34 李志亮, 李小将, 孙伟. 考虑成像质量的敏捷卫星任务调度模型与算法. 宇航学报, 2017, 38(6):590~597(Li Z L, Li X J, Sun W. Task scheduling model and algorithm for agile satellite considering imaging quality. *Journal of Astronautics*, 2017, 38(6): 590~597 (in Chinese))
 - 35 李玉庆, 徐敏强, 王日新. 三轴稳定卫星点目标观测任务优化调度技术. 吉林大学学报(工学版), 2008, 38(6): 1447~1451(Li Y Q, Xu M Q, Wang R X. Scheduling observations of spot object of three-axis stabilized satellites. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2008, 38(6):1447~1451(in Chinese))
 - 36 邱洁珊, 郭浩, 贺川, 等. 敏捷成像卫星多星密集任务调度方法. 航空学报, 2013, 34(4):882~889(Qiu D S, Guo H, He C, et al. Intensive task scheduling method for multi-agile imaging satellites. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(4):882~889(in Chinese))
 - 37 Habet D, Vasquez M, Vimont Y. Bounding the optimum for the problem of scheduling the photographs of an agile earth observing satellite. *Computational Optimization and Applications*, 2010, 47(2):307~333
 - 38 Cao X, Yue C, Liu M, et al. Time efficient spacecraft maneuver using constrained torque distribution. *Acta Astronautica*, 2016, 123:320~329
 - 39 叶东. 敏捷卫星姿态快速机动与稳定控制方法研究[博士论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013(Ye D. Research on fast maneuver and stabilization control for agile satellite. [Ph. D Thesis]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013(in Chinese))
 - 40 Spiller D, Melton R G, Curti F. Inverse dynamics particle swarm optimization applied to constrained minimum-time maneuvers using reaction wheels. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 75:1~12
 - 41 Yin M, Yang H, Baoyin H. Time-optimal reorientation of an autonomous agile earth observing satellite. In: The 27th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, San Antonio, Texas, 2017
 - 42 Bilimoria K D, Wie B. Time-optimal three-axis reorientation of a rigid spacecraft. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1993, 16(3):446~452

- 43 印明威,王贤宇,李京阳,等.航天器姿态机动的敏捷性评估.清华大学学报(自然科学版),2019,59(9):720~728(Yin M Wi, Wang X Y, Li J Y, et al. Assessing Spacecraft agility. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2019, 59(9):720~728(in Chinese))
- 44 Yin M, Li J, Wang X, et al. A rapid method for validation and visualization of agile earth-observation satellites scheduling. *Astrodynamics*, 2018, 2(4):325~337
- 45 Ranieri C L, Ocampo C A. Indirect optimization of spiral trajectories. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2006, 29(6):1360~1366
- 46 Hargraves C R, Paris S W. Direct trajectory optimization using nonlinear programming and collocation. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1987, 10(4):338~342
- 47 Lewi F L, Vrabie D, Syrmos V L. Optimal control. New Jersey: John Wiley & Sons, 2012
- 48 Pontryagin L S, Boltyanskii V G, Gamkrelize R V, et al. The mathematical theory of optimal processes. New York: Wiley, 1962
- 49 Betts J T. Survey of numerical methods for trajectory optimization. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1998, 21(2):193~207
- 50 李俊峰,蒋方华.连续小推力航天器的深空探测轨道优化方法综述.力学与实践,2011,33(3):1~6(Li J F, Jiang F H. Survey of low-thrust trajectory optimization methods for deep space exploration. *Mechanics in Engineering*, 2011, 33(3):1~6(in Chinese))
- 51 Li J. Time-optimal three-axis reorientation of asymmetric rigid spacecraft via homotopic approach. *Advances in Space Research*, 2016, 57(10):2204~2217
- 52 郭铁丁.深空探测小推力轨迹优化的间接法与伪谱法研究[博士论文].北京:清华大学,2012(Guo T D. Study of indirect and pseudospectral methods for low thrust trajectory optimization in deep space exploration [Ph.D Thesis]. Beijing: Tsinghua University, 2012 (in Chinese))
- 53 Dixon L C W, Biggs M C. The advantages of adjoint-control transformations when determining optimal trajectories by Pontryagin's maximum principle. *The Aeronautical Journal*, 1972, 76(735):169~174
- 54 Jiang F, Baoyin H, Li J. Practical techniques for low-thrust trajectory optimization with homotopic approach. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2012, 35(1):245~258
- 55 Haberkorn T, Martinon P, Gergaud J. Low thrust minimum-fuel orbital transfer: a homotopic approach. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2004, 27(6):1046~1060
- 56 Gergaud J, Haberkorn T. Homotopy method for minimum consumption orbit transfer problem. *ESAIM: Control, Optimisation and Calculus of Variations*, 2006, 12(2):294~310
- 57 Bertrand R, Epenoy R. New smoothing techniques for solving bang-bang optimal control problems-numerical results and statistical interpretation. *Optimal Control Applications and Methods*, 2002, 23(4):171~197
- 58 Martell C A, Lawton J A. Adjoint variable solutions via an auxiliary optimization problem. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1995, 18(6):1267~1272
- 59 Seywald H, Kumar R R. Finite difference scheme for automatic costate calculation. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1996, 19(1):231~239
- 60 Yan H, Wu H. Initial adjoint-variable guess technique and its application in optimal orbital transfer. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1999, 22(3):490~492
- 61 Ilgen M R. Hybrid method for computing optimal low thrust OTV trajectories. *Advances in the Astronautical Sciences*, 1992, 87(2):941~958
- 62 Kluever C A, Pierson B L. Optimal low-thrust earth-moon transfer with a switching function structure. *Journal of Astronautical Sciences*, 1994, 42(3):269~283
- 63 Kluever C A, Pierson B L. Optimal low-thrust three-dimensional earth-moon trajectories. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1995, 18(4):830~837
- 64 Gao Y, Kluever C. Low-thrust interplanetary orbit transfers using hybrid trajectory optimization method with multiple shooting. In: AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit, Rhode Island, 2004
- 65 任远,崔平远,栾恩杰.利用混合法进行地球-火星小推力轨道设计.哈尔滨工业大学学报,2007,39(3):359~362(Ren Y, Cui P Y, Luan E J. An earth-mars low-thrust trajectory design based on hybrid method. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2007, 39(3):359~362 (in Chinese))
- 66 Bai X, Junkins J L. New results for time-optimal three-axis reorientation of a rigid spacecraft. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2009, 32(4):1071~1076
- 67 Jacobson D, Gershwin S, Lele M. Computation of optimal singular controls. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1970, 15(1):67~73
- 68 Enright P J, Conway B A. Discrete approximations to optimal trajectories using direct transcription and nonlinear programming. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1992, 15(4):994~1002
- 69 Gill P E, Murray W, Saunders M A. SNOPT: An SQP al-

- gorithm for large-scale constrained optimization. *SIAM review*, 2005, 47(1):99~131
- 70 Coverstonecarroll V, Williams S N. Optimal low thrust trajectories using differential inclusion concepts. *Journal of the Astronautical Sciences*, 1994, 42(42):379~393
- 71 Hull D G. Conversion of optimal control problems into parameter optimization problems. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1997, 20(1):57~60
- 72 Betts J T. Optimal interplanetary orbit transfers by direct transcription. *Journal of the Astronautical Sciences*, 1994, 42(3):247~268
- 73 Scrivener S L. Time-optimal multi-axis attitude maneuvers of rigid spacecraft using collocation and nonlinear programming [Ph. D Thesis]. Pennsylvania: Pennsylvania State university, 1993
- 74 Fahroo F, Ross I M. Direct trajectory optimization by a Chebyshev pseudospectral method. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2002, 25(1):160~166
- 75 Huntington G T, Rao A V. Optimal reconfiguration of spacecraft formations using the Gauss pseudospectral method. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2008, 31(3):689~698
- 76 Garg D, Patterson M A, Francolin C, et al. Direct trajectory optimization and costate estimation of finite-horizon and infinite-horizon optimal control problems using a Radau pseudospectral method. *Computational Optimization and Applications*, 2011, 49(2):335~358
- 77 Benson D A, Huntington G T, Thorvaldsen T P, et al. Direct trajectory optimization and costate estimation via an orthogonal collocation method. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2006, 29(6):1435~1440
- 78 Elnagar G, Kazemi M A, Razzaghi M. The pseudospectral Legendre method for discretizing optimal control problems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1995, 40(10):1793~1796
- 79 Fahroo F, Ross I M. Costate estimation by a Legendre pseudospectral method. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2001, 24(2):270~277
- 80 Gong Q, Ross I M, Fahroo F. Costate computation by a Chebyshev pseudospectral method. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2010, 33(2):623~628
- 81 Li J. Analysis of the inertially symmetric rigid spacecraft time-optimal three-axis reorientation. *Optimal Control Applications and Methods*, 2017, 38(1):59~74
- 82 Li J, Xi X. Time-optimal reorientation of the rigid spacecraft using a pseudospectral method integrated homotopic approach. *Optimal Control Applications and Methods*, 2015, 36(6):889~918
- 83 Ross I M. User's manual for DIDO: A MATLAB application package for solving optimal control problems. Sweden: Tomlab Optimization, 2004
- 84 Patterson M A, Rao A V. GPOPS-II: A MATLAB software for solving multiple-phase optimal control problems using hp-adaptive Gaussian quadrature collocation methods and sparse nonlinear programming. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 2014, 41(1):1~37
- 85 Ross I M, Gong Q, Sekhvat P. Low-thrust, high-accuracy trajectory optimization. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2007, 30(4):921~933
- 86 Ross I M, Fahroo F. Pseudospectral knotting methods for solving optimal control problems. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2004, 27(3):397~405
- 87 Darby C L, Hager W W, Rao A V. An hp-adaptive pseudospectral method for solving optimal control problems. *Optimal Control Applications and Methods*, 2011, 32(4):476~502
- 88 Li F, Bainum P M. Numerical approach for solving rigid spacecraft minimum time attitude maneuvers. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1990, 13(1):38~45
- 89 Byers R M, Vadali S R. Quasi-closed-form solution to the time-optimal rigid spacecraft reorientation problem. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1993, 16(3):453~461
- 90 Meier E B, Ryson A E. Efficient algorithm for time-optimal control of a two-link manipulator. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1990, 13(5):859~866
- 91 Fleming A, Sekhvat P, Ross I M. Minimum-time reorientation of a rigid body. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2010, 33(1):160~170
- 92 Boyarko G, Romano M, Yakimenko O. Time-optimal reorientation of a spacecraft using an inverse dynamics optimization method. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2011, 34(4):1197~1208
- 93 Scrivener S L, Thompson R C. Survey of time-optimal attitude maneuvers. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1994, 17(2):225~233
- 94 Mehrpouya M A, Fallahi S. A modified control parametrization method for the numerical solution of bang-bang optimal control problems. *Journal of Vibration and Control*, 2015, 21(12):2407~2415
- 95 Steyn W. Near-minimum-time eigenaxis rotation maneuvers using reaction wheels. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1995, 18(5):1184~1189
- 96 Yin M, Wang X, Baoyin H. Time-optimal spacecraft reorientation for the observation of multiple asteroids. *Open Astronomy*, 2019, 28(1):110~123
- 97 Seywald H, Kumar R R. Singular control in minimum time spacecraft reorientation. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2019, 42(1):1~12

- trol, and Dynamics*, 1993, 16(4):686~694
- 98 Goddard R H. A method of reaching extreme altitudes. *Nature*, 1920, 105(2652):809~811
- 99 Shen H, Tsiotras P. Time-optimal control of axisymmetric rigid spacecraft using two controls. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1999, 22(5):682~694
- 100 Lee T, Leok M, McClamroch N H. Time optimal attitude control for a rigid body. In: 2008 American Control Conference, Washington, 2008:5210~5215
- 101 印明威, 李京阳, 宝音贺西. 敏捷卫星姿态机动的奇异最优控制. *光学精密工程*, 2018, 26(4):906~915 (Yin M W, Li J Y, Baoyin H X. Singular optimal control for three-axis reorientation of an agile satellite. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(4):906~915 (in Chinese))
- 102 King J T, Karpenko M. A simple approach for predicting time-optimal slew capability. *Acta Astronautica*, 2016, 120:159~170

REVIEW ON TIME-OPTIMAL REORIENTATION OF AGILE SATELLITES *

Baoyin Hexi[†] Yin Mingwei

(School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Agile satellites are the new generation of Earth Observing Satellites. Their agility has generated intense military and commercial interests. The biggest advantage of agile satellites is that they can reorientate themselves in a short time, and one of the research priorities for agile satellites is on reorientating them in a minimum time. For the problem of time-optimal reorientation of agile satellites, this paper reviews in detail the optimization algorithms for time-optimal reorientation and the characteristics of time-optimal solution.

Key words agile satellite, time-optimal, bang-bang control, singular optimal control

Received 25 September 2019, revised 30 November 2019.

* The project supported by the National Science Found for Distinguished Young Scholars(11525208)

[†] Corresponding author E-mail: baoyin@tsinghua.edu.cn