

DOI: 10.3969/j.issn.1672-8874.2011.02.015

# 深空轨道优化竞赛与我校研究生培养

孟云鹤, 罗宗富, 连一君, 蒋小勇, 陈杰

(国防科学技术大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

**[摘要]** 简介全国轨道优化设计竞赛和第五届国际轨道优化竞赛(GTOC)及参赛一般过程, 总结我校参赛队的差距与收获, 思考该赛事对于我校研究生培养的意义, 并对今后的参赛提出展望。

**[关键词]** 国际轨道优化竞赛; 全国深空轨道优化设计竞赛; 研究生培养; 教学改革

**[中图分类号]** G643 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1672-8874(2011)02-0052-04

## The Trajectories Optimization Competition for Fostering the Graduates in our College

MENG Yun-he, LUO Zong-fu, LIAN Yi-jun, JIANG Xiao-yong, CHEN Jie

(College of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** China National Trajectories Optimization Competition and Global Trajectories Optimization Competition are introduced. The general process of the competitions is also described. The gains and disparity are presented. Then, the influence of the competitions on the education of the graduate students in our college is analyzed and the future competition is in prospect.

**Key words:** global trajectories optimization competition; china national trajectories optimization competition; education of graduate students; teaching reform

进入21世纪以来, 作为彰显实力的航天技术领域得到了世界各国的重视, 技术上不断取得突破。首先是对于火星的探测, 以美国的“奥德赛”、“勇气号”、“机遇号”、“凤凰号”等为代表的一系列火星探测器取得了成功; 2005年, “深度撞击”探测器对“坦普尔1号”彗星成功实施了动能撞击式探测; 2009年, 欧空局成功地将“普朗克”、“赫歇尔”天文台送到150万千米的日地L2平动点附近; 2010年, 美国的“ARTEMIS”计划<sup>[1]</sup>又拉开了地月平动点轨道探测的序幕。新一轮的深空探测热潮正在兴起。

从技术理论角度讲, 最优控制理论、三体轨道理论、不变流形理论、弱稳定边界理论、轨道优化理论、近旁转向技术、小推力技术、太阳帆技术等轨道理论、技术与方法在不断发展和完善, 一场围绕深空探测轨道设计技术的革命正在到来。

在此背景下, 欧空局(ESA)新概念研究小组(Advanced concepts team, ACT)2005年发起了国际轨道优化设计竞赛(Global Trajectories Optimization Competition, GTOC)<sup>[2]</sup>, 按照比赛规定, 每年的比赛由上一届的冠军队伍举办, 利用ESA的官方网站向全世界发布题目, 在规定的时间内通过E-mail反馈各队计算的结果, 由组办方对

结果进行复核, 最终确定排名, 并网上公布。五年来, 世界的知名研究机构与组织, 如ESA、JPL、CNES、DLR、密歇根技术大学、德克萨斯大学、莫斯科航空学院、意大利都灵理工大学以及我国的清华大学等纷纷组队参赛, 使得这项赛事的知名度越来越高, 目前已成为国际航天界的经典赛事, 成为了一个国际航天轨道动力学研究的高水平交流平台<sup>[3]</sup>。受此启发, 清华大学于2009年发起了全国的深空轨道优化设计竞赛<sup>[4]</sup>, 比赛形式效法GTOC, 国内知名的相关航天单位与院所多组队参赛。国内与国际轨道设计竞赛的出现是航天技术“热”的一个表现。

我校有着全国最早的航天技术学科, 我们受邀参加了2009年的全国轨道优化设计竞赛, 捧回了季军奖杯, 在此基础上参加了2010年的GTOC-5<sup>[5]</sup>国际比赛, 提交了有效结果, 在39个参赛队中获得13的名次。

### 一、国内、国际深空探测轨道设计赛事介绍

#### (一) 国际赛事

从2005年至今, GTOC已经成功举办5届, 本次我们参加的即GTOC-5, 表1简单回顾了历届比赛的基本情况<sup>[5]</sup>。

**[收稿日期]** 2011-01-12

**[基金项目]** 国家自然科学基金(10702078)

**[作者简介]** 孟云鹤(1978-), 男, 河北永清人, 国防科学技术大学航天与材料工程学院副教授, 博士。

表 1 历届 GTOC 比赛情况回顾

GTOC	组办方	问题描述	报名与提交结果队伍	前六名
第一届	欧空局 (ESA)	从地球出发的航天器采用电推力技术,与目标小行星 2001TW229 进行撞击;允许近旁转向;指标:撞击动能	17/12	JPL、eimos、GMV、MAI、PdT、CNES
第二届	喷气推进实验室 (JPL)	从地球出发的航天器,分别与 4 个小行星群中的 4 颗小行星交会,且至少与该小行星伴飞 90 天;不允许近旁转向;指标:剩余质量/总飞行时间	26/13	PdT、MAI、ESA、CNES、GMV、DLR
第三届	意大利都灵理工大学 (PdT)	从 140 颗小行星数据库中任选 3 颗进行交会,最后返回地球;允许地球近旁转向;指标: $m_f/m_f + 0.2 \min_{j=1,2,3}(t_j)/10$	26/16	CNES、JPL、Georgia Tech、Deimos、TAC
第四届	法国空间研究中心 (CNES)	给定 1437 颗小行星,从地球出发采用小推力尽可能多的造访小行星,最后选取一颗小行星(未进行飞掠)进行交会;不允许近旁转向;指标:造访小行星数目	47/26	MSU、TAC、ESA、Deimos、GMV、JPL
第五届	莫斯科国立大学 (MSU)	给定 7075 颗小行星,对每颗选定的小行星先后进行交会和飞掠;不允许近旁转向;指标:完成任务次数	39/19	JPL、PdT、Tsinghua、ACT、GIT、UTA inc

(注: MAI: Moscow Aviation Institute; PdT: Politecnico di Torino; TAC: The Aerospace Corporation; TAS: Thales Alenia Space; MSU: Moscow State University; ACT: Advanced Concepts Team; GIT: Georgia Institute of Technology; UTA inc: University of Texas, Odyssey Space Research, ERC Incorporated. )

从表 1 可以看出:

- (1) 竞赛题目的背景是小行星探测,因为小行星探测是深空探测的重要组成部分,也代表了复杂多任务深空探测轨道设计的发展趋势;
- (2) 报名参赛的队伍呈增加的发展趋势,这说明赛事的影响越来越大,越来越多的研究组织、机构希望通过参与该赛事为自身定位;
- (3) 提交有效结果的队伍占参赛队的比例约为 1/2,这也说明了题目具有相当大的难度;
- (4) JPL、Deimos、GMV、PdT、CNES、ESA、TAC、MSU 以及 MAI 等队伍一直居于前列,这些队伍在航天动力学和优化方法方面均表现非常出色,其中差别主要来源于选星序列的差异。

表 2 为 GTOC - 1 ~ 5 中国报名队伍和提交结果情况。

表 2 历届比赛中国报名队伍和提交结果情况一览表

GTOC	报名队伍	提交结果	排 名
第一届	清华	清华	11
第二届	清华	清华	10
第三届	清华、武大、北航	清华	11
第四届	清华、北航、南航、中科院	清华、北航、南航、中科院	清华: 20; 北航: 22; 南航: 超出约束; 中科院: 晚交结果
第五届	清华、北航、南航(3)、中科院(1)、国防科大(2)、西工大、地大	清华、国防科大(2)	清华: 3 国防科大: 13

国内参赛队伍中清华大学属于老牌队伍,从第一届到最近举办的第五届均参加了比赛,并且取得了不错的结果;

同时从表中也可以看出近两年中国队伍报名较为积极,但是提交结果存在问题的队伍较多,说明我们与世界强队相比存在整体差距。

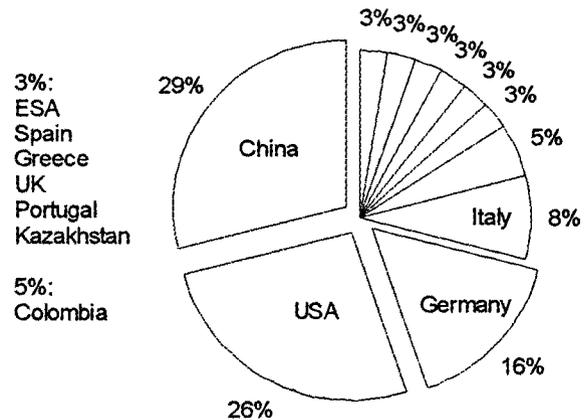


图 1 GTOC-5 报名队伍国别情况

根据 GTOC-5 的报名情况,本届比赛中国报名队伍超过美国(10支),达 11 支之多,如图 1 所示,但提交结果的 19 支队伍中,美国占 7 支,中国只有清华、科大(两支)共三支队伍,如果考虑国家整体水平,这一结果值得我们思考。

(二) 国内赛事

2009 年 3 月 - 5 月,由清华大学组织了第一届全国深空探测轨道设计竞赛,报名参赛的队伍有 33 支,来自国内航天专业的科研院所和高校基本涵盖了轨道动力学研究领域的各个单位,具体包括:西安卫测、北京跟踪与通信技术研究所、中国科学院、航天一院、航天八院、北航、南航、大连理工、浙江大学、南京大学、武汉大学、四川大学、国防科技大学等单位,我校共有 3 支队伍参赛。

竞赛在 3 月之前完成报名,3 月 5 日发布题目,4 月 15 日前提交结果,4 月底清华对各组提交结果进行复核,最终进行排名。5 月 16 日在北京清华大学航天学院举行学术研

讨会,排名前四的队伍分别进行了发言。

2010年3月-6月西安卫星测控中心与中科院合作主办了第二届深空探测轨道设计竞赛,15支队伍参加了比赛。

(三) 我校参赛队的成绩

受清华大学的邀请,我们组织了4名研究生“罗宗富、蒋小勇、张跃东、连一君”加两名教员“孟云鹤、安雪滢”共六人的参赛队伍,参加了2009年3月-5月的第一届全国深空探测轨道设计竞赛,成绩为第3名;2010年的第二届全国深空探测轨道设计竞赛,因故缺席。

表3 首届深空轨道设计竞赛<sup>[4]</sup>

排名	队名	联系人	单位	指标
1	Team1	高扬	中国科学院光电研究院	51.24
2	Team31	张智斌	西安卫星测控中心技术部软件室控制组	31.26
3	Team21%	孟云鹤	国防科技大学航天学院	27.16
4*	Team32	王维	西安卫星测控中心	19.78
**	Team30	王天怡	武汉大学数学与统计学院	60.87
**	Team10	南英	南京航空航天大学	1417.3
**	Team33	黄国强	南京航空航天大学航天学院	619.08

(注: \*轻度违反约束, \*\*违反约束,%为我校参赛队)

2010年10月,我们组建了“罗宗富、蒋小勇、连一君、陈杰、孟云鹤”5人的参赛队伍,参加了国际深空探测轨道优化设计竞赛,即GTOC-5,提交了有效结果,名列13位。成绩虽然不是很理想,但带给了我们很多收获。

表4 GTOC-5成绩<sup>[4]</sup>

排名	单位	指标 J	指标 T (day)
1	JPL	18	5459.29
2	意大利都灵理工大学	17	5201.58
3	清华大学	17	5277.86
4	ESA - ACT/意大利 Florence 大学全局优化实验室	16	5181.81
5	美国乔治亚理工大学	16	5420.16
6	美国 Texas 大学奥斯丁分校	15	5394.16
7	德国 DLR 航天系统所	14	5438.00
8	美国分析力学联合有限公司	13	5144.64
9	美国航天公司	12.2	5472.08
10	德国 VEGA 公司	12	4873.99
11	英国斯特拉思克莱德大学/格拉斯哥大学	12	5241.90
12	德国 Friedrich - Schiller 大学	11	5475.55
13	国防科技大学航天与材料工程学院%	8	4819.10
14	美国 Missouri - Columbia 大学	1.8	4705.33
15	德国 InTrance - DLR/FH Aachen/EADS	1.2	1271.0
晚交结果的队伍			
	意大利 Trento 大学	10	5241.82
	国防科技大学航天与材料工程学院	13	5035.33

排名	单位	指标 J	指标 T (day)
违反主要约束的队伍			
	AEVO - UPC (德国/西班牙)	6.4	5290.0
	美国 Michigan 科技大学/阿拉巴马大学	4.2	4215.45

(注:%表示我校参赛队.)

二、竞赛的一般过程与收获

(一) 解决问题的一般过程与理论方法

纵观历年的 GTOC 题目,具有较大相似之处:一是都是以小行星探测为背景;二是需要探测数目众多的小行星;三是都用到高比冲的小推力发动机进行轨道机动,这代表了技术的发展趋势,同时使得每一段轨道具有强非线性;四是都给出了指标函数,需要进行大量寻优计算。

因此该问题包括几个重要的组成部分:首先是小行星的选择与序列的确定,即探测哪些星,按什么顺序;第二则是将每一段轨道应用小推力实现,满足约束;接下来则是进一步优化时间序列与每段小推力机动轨道,提升指标,最后数据输出并演算,因此 GTOC 问题的一般求解过程如图 2 所示。

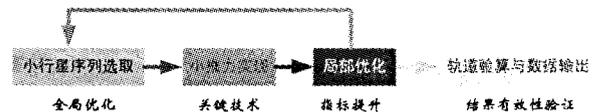


图2 GTOC问题求解的一般过程

选星思路主要有“流管套星法”、“黄道面投影法”以及“穷举法”等;小推力实现手段主要分直接法、间接法和混合法等。需要说明的是轨道验算与数据输出,按题目要求提供可以验证的数据点信息才能实现成绩认定与排名,这是竞赛的最后一步,也是很多参赛队往往忽视的一步,数据的插值与格式输出看似简单,实则要求扎实细致。

GTOC 竞赛是一项集人员管理、技术攻关和心理考验于一身的大考核,需要“统筹安排,科学组织,重点攻关,积极拼搏”。

(二) 竞赛过程的收获

参加 GTOC 的团队均是国际上轨道动力学、设计与优化研究领域的佼佼者,能够与诸多专家和学者同台竞技,机会非常难得。参加 GTOC 比赛,我们有很大收获。

(1) 在较短的时间内提交针对一个非常复杂问题的研究结果,这锻炼了我们理解问题、分析问题和解决问题的能力,也开阔了视野;

(2) 竞赛的工作量非常大,需要成员之间的密切合作,增强了成员的协作意识,提高了成员间协作的默契程度;

(3) 磨练了参赛队员的意志品质,锻炼了团队在较大压力下高效工作的能力;

(4) 激发了大家对先进理论和方法的研究兴趣,争取了一次与国际同行进行交流机会,这有助于我们定位自身的实力和水平,既看到了差距,又坚定了信心;

(5) 走过了“希望成功一勇于付出一敢于成功”的心路历程,其中最难的是“敢于成功”这一步,因为首次参赛,理论、方法、工具、经验等积累不足,特别是到最后阶段,

时间越来越少，与期望的差距越来越远，心理压力越来越大，甚至想放弃，面对终点，敢不敢冲刺，就特别重要了，我们的几位研究生喊出了“亮剑精神”，相互支持，相互帮助，坚持到了最后，并提交了结果，获得了一个名次，即使并不理想，但我们揭开了 GTOC 的神秘面纱，今后会有一个更为平和的参赛心态，这是我们获得的最大财富。

### (三) 不足

通过参与竞赛，我们认识到自身的不足，主要有：

#### (1) 小行星序列选取优化理论与方法储备不足

GTOC 的举办初衷是为检验各参赛队伍的全局优化能力，小行星序列的初步选取是全局优化的关键，目前国际上没有通用的方法处理这一问题，但各强队结合理论分析与实践经验，形成各自的一套选星思路。我们针对 GTOC 问题进行全局优化的能力和经验均显不足，没有时间对问题进行更深层次的分析，找到的仅是一个可行解。距离国际先进水平，我们有很大差距，还需要积累。

#### (2) 小推力轨道优化实现工具的落后

古语有云：“工欲善其事，必先利其器”，参加 GTOC，小推力技术就是其中的“器”。国际知名机构经过几十年的技术积累，已经形成了配套的软件和硬件设施，如 JPL 的 STOUR - LTGA 和 MALTO、DEIMOS 的 MULFLY 和 OPTMIS，Purdue 大学等高校开发的 GALLOP。我参赛队花费了将近一周时间专门进行小推力技术攻关，很大部分时间花费在程序的编写和调试中，耽误了小行星序列的选取；从工具角度而言，我们是“鸟枪”对“大炮”，差距巨大，这同时也是制约中国参赛队伍取得好成绩的“瓶颈”之一。

(3) 分工不太合理与时间分配不够科学影响了最终的性能指标

本次比赛正值我国国庆放假期间发布题目，因此连续耽误了快一周时间大家才进入状态，另外，未进行明确的分工，导致主力集中消耗在前期的选星工作中，后期又临时调整，影响了指标的提升，图 3 中给出了我参赛队的实际时间使用情况，以及相比较更好的时间组织形式，可以为下次参加比赛提供参考。

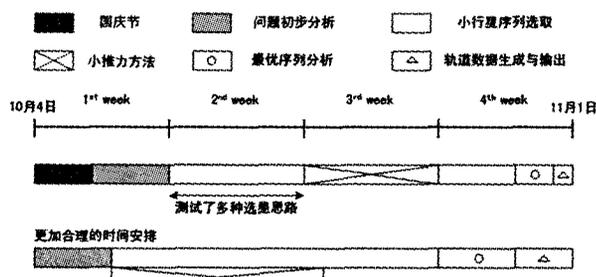


图 3 比赛时间安排分析

### 三、GTOC 对我校研究生培养的意义

国际、国内深空探测轨道设计竞赛是航天动力学领域的一项重要赛事，是世界航天轨道动力学研究团队同场竞技的舞台，参与该项赛事对于我校的科学研究与研究生培养具有重要意义，具体有如下几点：

第一，GTOC 为我校与国际知名航天研究所与研究团队的交流提供了一个良好平台。每届 GTOC 比赛公布结果后，承办单位都要发出邀请函，请参与竞赛的队伍与单位

人员参加学术研讨，这是一个良好的交流平台，如果取得好成绩则更有助于扩大我校的国际影响；

第二，GTOC 为我们提供了学习先进理论与方法的契机。GTOC 比的是什么？是学术研究的基础与技术的积累，是对于航天轨道动力学的理解，是解决复杂优化设计问题的能力，是先进理论与方法的集成化与软件化，清华的李俊峰教授曾说过“GTOC 是综合国力的较量”<sup>[3]</sup>，参与比赛使我们认识到了差距，赛场如战场，我们只有学习，创新，再学习，再创新，才能在未来胜出。

第三，参与 GTOC 竞赛有助于促进我校高素质人才的培养。参与 GTOC 的过程中，开阔了研究问题的视野，提高了分析解决问题的能力，丰富了航天任务背景的素养，锻炼了心理素质，磨炼了意志品质，这些都是高素质人才所必需的素质，GTOC 给我校研究生的培养带来了“他山之石”。

第四，GTOC 对于我校的研究生培养有启发意义。我们的研究生该如何培养？要他们学会什么？应该是“知识”与“应用知识”的能力，既要认识理论体系，又要学会应用理论解决实际问题，还要知道如何将理论变成解决问题的工具；GTOC 的实践告诉我们：从先前学过的“航天动力学理论”、“优化理论”到解决深空轨道的优化设计的实际问题，有一段很长的路要走，这段路还不仅仅是一个技术过程，它承载了诸如体力、心理、意志等更多的东西，而这段路往往是我们的人才培养中所缺失的；目前，我校正在进行的研究生教学改革<sup>[6]</sup>，要求加大实践性课程的教学，提高研究生的动手能力，正是在解决这一问题。

第五，GTOC 对于我校的研究生教学模式改革有启发意义。经典的“讲授 + 笔试”模式有利于理论体系的教学，即补充理论知识；“讲授 + 笔试 + 大作业”的方式有利于理论学习，兼顾一些实践能力的培养；“讲授 + 研讨 + 大作业”的方式则更适用于前沿课程的教学；这些课程教学与考核的模式各有侧重，而 GTOC 的实践为我们提出了一种新的模式，即“指导 + 竞赛”模式。为了突出个性化培养<sup>[6]</sup>，能否可以考虑将参加 GTOC 等竞赛活动引入研究生教学之中，或者能计入一定的学分，这对于创新研究生教学模式、培养研究生实践能力以及综合素质等将有所裨益。

### [参考文献]

- [1] Angelopoulos V, Lillis R, Sibeck D G, et al. ARTEMIS, a two spacecraft planetary and heliospheric lunar mission [c]. 41st Lunar and Planetary Science Conference, 2010:1425.
- [2] ACT - Mission Analysis and Design, <http://www.esa.int/gsp/ACT/mad/op/GTOC/index.htm>.
- [3] 李俊峰, 祝开建. 2005 ~ 2009 年国际深空轨道优化竞赛综述 [J]. 力学与实践, 2010, 32(4): 130 - 137
- [4] 戴世强. 江山代有才人出 [J]. 力学与实践, 2010, 32(4): 137 - 138.
- [5] GTOC - 5 home page, <http://mech.math.msu.su/gtoc5>.
- [6] 国防科技大学研究生院. 抓好研究生培养顶层设计, 推动研究生教育科学发展 [J]. 高等教育研究学报, 2009, 32(S)1 - 2.

(责任编辑：林聪榕)