

DOI: 10.3969/j.issn.1672-8874.2013.04.011

轨道设计竞赛与航天专业研究生培养

罗亚中, 李海阳, 沈红新

(国防科学技术大学 航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

[摘要] 轨道设计竞赛作为专业竞赛并非专门面向研究生培养设计, 通过对其建立和发展历史的回顾, 分析了竞赛题目的特点和对科研能力的训练作用。结合所在团队参加轨道设计竞赛的实践体会, 探讨了专业竞赛在研究生培养中的应用, 提出了将专业竞赛作为基础教育和科研实践的过渡链条的基本定位。

[关键词] 研究生培养; 轨道设计竞赛; 航天专业

[中图分类号] G642.0 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1672-8874(2013)04-0034-04

Practical Investigation on Training Aerospace Major Postgraduates by Means of Trajectories Optimization Competition

LUO Ya-zhong, LI Hai-yang, SHEN Hong-xin

(College of Aerospace Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The trajectories optimization competition which is one professional competition is not designed especially for postgraduate training. The paper reviews its development history and analyses the characteristics of competition problems and the training effects on research abilities. The application of the professional competition in postgraduates training is analyzed based on our group's experiences in attending the trajectories optimization competitions. It is proposed that the professional competition can be regarded as the shift process between the basic study and the research practice.

Key words: trajectories optimization competition; postgraduates training; aerospace major

素质教育是从学龄前到研究生教育共同关注的教育思想, 从一般意义上来说, 素质教育是以全面开发人为宗旨的一种教育, 而到了研究生阶段, 随着所学知识和技能深入, 专业化倾向越来越强, 素质教育不应该仍然停留在宽泛和通用的层面, 而是需要在专业素质方向凝练和实质化。^[1-3]专业素质的提升需要通过专业课程学习、科研实践、学位论文撰写等过程来逐步实现, 其中科研实践和学位论文一般会有良好的结合, 但课程学习和实践环节的拼接往往会因为科研任务的不确定性难以保证平稳过渡, 从而造成专业素质培养效果难以充分保证。本团队在对航天类研究生指导过程中, 探索了通过专业竞赛作为培养中间环节的研究研究生培养策略。

一、轨道设计竞赛简介

轨道设计竞赛包括国内和国际两个赛事, 两个比赛内容和目标类似, 但没有直接的附属关系。国际轨道设计竞赛称为全局轨道优化竞赛 (GTOC: Global Trajectories Optimization Competition), 又译作国际深空轨迹优化竞赛。^[4-6]2005年, 欧空局新概念小组 (ACT: Advanced Concepts Team) 发起并组织了第一届竞赛 GTOC1, 之后每

年一届, 由上届冠军负责出题, 利用欧空局官方网站向全球发布, 从问题发布到提交解决方案的时间期限为一个月。到目前为止 GTOC 已经举办了六届, 美国 JPL (Jet Propulsion Laboratory) 实验室的外行星任务分析研究小组 (The Outer Planets Mission Analysis Group) 取得第一届冠军和第五届冠军, 并组织了第二届和第六届比赛; 意大利都灵理工大学 (the Dipartimento di Energetica of the Politecnico di Torino) 的空间推进小组 (The Aerospace Propulsion Group) 取得第二届冠军, 并组织了第三届比赛; 法国国家空间研究中心 (the Centre National d'Etudes Spatiales de Toulouse) 的行星际任务分析团队 The Interplanetary 取得第三届冠军, 并组织了第四届比赛; 莫斯科国立大学 (Lomonosov Moscow State University) 的力学与数学系团队 (the team of Faculty of Mechanics and Mathematics) 取得第四届冠军, 并组织了第五届比赛; 意大利都灵理工大学和罗马大学 (Politecnico di Torino & Universita di Roma "Sapienza") 联队取得第六届冠军, 并将负责组织第七届比赛。

国内轨道设计竞赛称为全国深空轨道设计竞赛, 赛制类似于 GTOC, 首届比赛由中国力学学会、清华大学航天航

[收稿日期] 2013-10-28

[基金项目] 国防科学技术大学教育教学改革研究课题 (jjsy2012013)。

[作者简介] 罗亚中 (1979-), 男, 河南鲁山人, 国防科学技术大学航天科学与工程学院副教授, 博士。

空学院发起并主办，来自全国的33支队伍报名参赛，最终有7支队伍提交了结果，来自中科院光电研究院空间工程部的参赛队伍获得冠军，西安卫星测控中心和国防科技大学航天与材料工程学院的参赛队分别获得亚军和季军。第二届全国深空轨道设计竞赛由中国力学学会、西安卫星测控中心宇航动力学国家重点实验室和中科院光电研究院空间工程部共同主办，31支队伍参赛，15个队按时提交了结果，清华大学航天航空学院获得冠军，国防科技大学航天与材料工程学院和中国科学院空间科学与应用中心分获亚军和季军。第三届（2011年）全国深空轨道设计竞赛由中国力学学会、北京航天飞行控制中心、航天飞行动力学技术重点实验室、清华大学共同主办，中科院空间应用工程与技术中心获得冠军，南京大学天文系/紫金山天文台联队与宇航动力学国家重点实验室分别获得亚军和季军。第四届（2012年）全国空间轨道设计竞赛由中国力学学会、中国科学院空间应用工程与技术中心、航天飞行动力学技术重点实验室、国防科技大学共同主办，从本届起“全国深空轨道设计竞赛”更名为“全国空间轨道设计竞赛”，国防科技大学航天科学与工程学院获得冠军，清华大学航天航空学院和中国科学院紫金山天文台并列获得了亚军。

二、轨道设计竞赛题目及其特点

轨道设计竞赛的题目一般以深空探测任务为背景，动力学模型采用二体模型，忽略轨道的摄动效应，设计目标是通过脉冲、小推力或引力甩摆等变轨手段，实现特定的深空探测目的。这些问题在数学上通常表示为一个多目标全局优化问题，由于轨道运动的非线性特点，该优化问题存在大量的局部最优解，如何在这些局部最优解中得到全局最优解是比赛的核心问题。

GTOC1的题目类似2005年NASA实施的深度撞击任务，要求设计一个小行星撞击任务，以小行星2001 TW229为目标，通过撞击使其改变轨道，达到保护地球的目的。设计约束为：飞行时间少于30年，发射窗口为2010-2030年，探测器质量为1500Kg，推力大小方向均可变，最大值为0.04N，比冲为2500s，可以借助其他行星引力辅助。设计目标是使指标 $J = m_f |U_f \cdot V_{af}|$ 最小，其中 m_f 为撞击时刻探测器质量， U_f 为相对速度矢量， V_{af} 为小行星速度矢量。

GTOC2的题目要求从地球发射小推力探测器，进行多颗小行星探测。设计约束为：探测器离开地球时质量1500kg，其中1000kg为燃料，推力的大小和方向可任意变化，最大推力为0.1N，推进器比冲为4000s，发射窗口取在2015年1月1日到2035年12月31日之间，逃逸速度不能超过3.5km/s，方向可任选。探测器在发射后需要与分别来自4个小行星群的4颗小行星交会，然后至少与该小行星伴飞90天，总飞行时间不能超过20年。优化指标为探测器剩余质量与总飞行时间的比值。

GTOC3的题目要求从地球发射小推力探测器，与给定140颗小行星中的任意3颗进行交会，最后返回地球。探测器的初始质量为2000kg，地球逃逸速度为0.5km/s，方向可以任意选择，推力最大为0.15N，推力方向可以任意改变，比冲为3000s，发射窗口为2016年到2025年，整个飞行时间不能超过10年，每一次和小行星交会以后必须在小

行星上停留至少60天以上，可以利用地球引力甩摆。优化指标为 $J = \frac{m_f}{m_i} + \frac{\min(\tau_1, \tau_2, \tau_3)}{50}$ ，其中 m_i, m_f 为探测器的初始和最终质量， τ_1, τ_2, τ_3 为探测器在小行星上的停留时间，单位为年。

GTOC4的题目同样考虑利用小推力探测器进行近地小行星（NEA）探测，要求一次飞行中的飞越小行星越多越好，并在最后一颗小行星停留。约束条件：以给定的1400颗小行星为目标，飞行时间不超过10年，发射窗口为2015-2025年，探测器逃逸质量为1500Kg，其中包括1000kg推进剂，推力大小方向均可变化，最大值为0.135N，比冲为3000s，不考虑引力甩摆。优化目标分为两层，第一指标为飞越的小行星数，若第一指标相同则考虑第二指标剩余质量。

GTOC5的主题是如何造访和二次造访最大数量的小行星。探测器首先需要与一颗小行星交会，在上面放置科学仪器，其后要再次飞越这颗小行星，并投掷撞击器。约束条件：以7000多颗小行星为目标，发射窗口在2015到2025年，任务时间小于15年，逃逸速度5km/s，逃逸速度方向任意，发动机推力小于0.3N，探测器初始质量4000kg，干重500kg，每个科学仪器的质量为40kg，各个撞击器的质量为1kg，飞越速度不小于0.4km/s。优化目标为使指标J最大，J的数值由任务执行数累加得到，首次交会记0.2，二次飞越记0.8，先飞越不记分，得分相同以任务完成时间最短为辅助指标。

GTOC6竞赛题目背景设定为通过探测器近距离飞越4颗木星的卫星（木卫一、二、三、四）尽量实现各个卫星的全球覆盖探测。每颗卫星表面利用32个平面近似表达（采用足球模型，包括12个正五边形与20个正六边形平面），探测器每次近距离飞越一个平面并赋予相应分值，设计结果力求总得分最高。发射窗口在2020-2030年，逃逸速度3.4km/s，发动机推力小于0.1N，比冲2000s，飞行过程中探测器质量不能低于1000kg，飞行时间小于4年。

第一届全国深空轨道设计竞赛的主题是指定小行星交会并停留，再返回地球。要求利用小推力使飞行器与小行星2001GP2交会，并停留至少100天。探测器初始质量5000kg（燃料1000kg），最大推力为0.2N，比冲3000s，推力方向任意，发动机开关时间和次数无限制（电推进背景），发射窗口为2010年~2020年，总任务时间不超过10年，与小行星交会以及返回地球时的位置误差小于5000km，速度误差小于5m/s。优化目标为

$$J = [1 + 0.1 \log(\frac{10000}{1 + (dr + 1000dv)})] [\frac{m_f}{t_1} + 0.02(t_2) - 100]$$

→max 其中 t_1 为飞行时间， t_2 为停留时间， m_f 为剩余质量， dr 为交会位置误差， dv 为交会速度误差。

第二届全国深空轨道设计竞赛的主题是深空多任务探测器飞行轨道设计。要求设计一个深空探测任务，同时实现小行星飞越、火星着陆和小行星撞击。探测器携带着陆器的总初始质量为固定的1500kg，探测器具有独立的变轨能力，着陆器没有独立的变轨能力，探测器选择合适的时机释放着陆器，释放后的着陆器飞往火星并着陆；探测器要对168个小天体尽可能多地造访（飞越），并对最后造访的小天体实施撞击；探测器可以选用小推力发动机也可以

采用常规发动机,两者的推力大小和比冲有差异,且不能够同时选用。优化目标是使综合指标最小,综合指标包括三个方面,一是着陆器质量,二是撞击动能,三是造访小行星数。

第三届全国深空轨道设计竞赛探测器主题是太阳系大行星和小行星探测飞行轨道优化设计。探测器将于2015年1月1日-2025年12月31日之间任意时刻从地球出发,选取太阳系八大行星和若干小天体开展多种形式探测,探测形式包括飞越和交会。探测器总质量3500kg,其中燃料3000kg。运载火箭最大可为探测器提供大小为3km/s的逃逸速度,方向任意选择。探测任务总时间不超过20年。推进方式为电推进或大推力化学推进。其中电推进比冲3000s,最大推力为0.3N。根据探测任务所包含的探测目标与探测类型,飞行轨道设计结果将获得相应的得分,并以此作为评价标准。

第四届全国深空轨道设计竞赛探测器主题是太阳系小天体探测飞行轨道优化设计。探测器将于2015年1月1日-2025年12月31日之间任意时刻从地球出发,选取太阳系若干小天体开展多种形式探测,探测任务总时间不超过15年。小天体探测目标分为近地小行星、主带小行星、“大”小行星、彗星4类;探测类型分为交会、飞越、撞击、取样返回4种。探测器飞行过程中可在任意时刻利用行星引力辅助,飞行过程中探测器与太阳的距离不能小于0.2倍天文单位(0.2AU),探测任务结束时探测器剩余质量不能小于500kg。推进方式为太阳能电推进或大推力化学推进。根据探测任务所包含的探测目标与探测类型,飞行轨道设计结果将获得相应的得分,并以此作为评价标准。

综合来看,轨道设计竞赛题目具有以下特点:

- (1) 专业背景鲜明,即以深空探测任务设计为背景;
- (2) 面向对象为科研院所和高校,但不限于飞行器设计专业领域,为此在动力学模型上都采用近似模型;
- (3) 总模型可以归结为一个全局优化问题,为使问题具有很大的设计空间且存在大量局部最优解,都选取了几百至上千颗小行星作为任务对象;
- (4) 问题复杂,但可以在四周的时间内完成;
- (5) 每个问题设计都具有特殊性,难以用已有的工具直接求解;
- (6) 参赛为通讯赛,以团队为单位,不限人数,自由开放,更接近一项科研任务。

三、轨道设计竞赛对研究生科研能力的训练作用

本团队在2010年春季首次参加了第二届全国深空轨道设计竞赛,取得了亚军;在2012年第四届全国空间轨道设计竞赛中夺得冠军,获得了第五届全国空间轨道设计竞赛主办权。比赛中,我们以研究生为主体开展技术攻关,教员全程参与方案设计与讨论。通过比赛我们取得了深刻的体会,感到轨道设计竞赛能够为飞行器设计专业研究生科研能力提高提供全方位的训练,这体现在以下方面:

(一) 通过竞赛,可以有效创建团队协作氛围

现代科学和技术的发展,在一定意义上可以看成一种团队文化,整个社会可以看成是一个大团队,今人和古人也可以构成一种广义的团队,一个科研项目可以汇聚一个小型的临时团队。个人只有有效地融入团队,才能够发挥

他的真正价值。而我们的课堂教育更多地注重个人知识水平地提高,注重个人独立解决问题的能力,这使得很多研究生在进入科研工作后,难以适应分工、合作、协调等团队工作模式,疏于了解他人、借鉴他人。而轨道设计竞赛要求团队参赛,团队成员要在一个月时间内团结协作,有效地完成设计任务。这种团队规模和任务要求合适,对研究生的团队组织、团队分工是一种有效训练,也可以有效训练研究生把握如何使个人能力在团队任务中充分发挥。

(二) 通过竞赛,可以有效提升专业知识水平

轨道设计竞赛对轨道动力学知识要求并不深,但有足够的广度,通过优化问题把轨道设计中的冲量变轨、连续变推力变轨、引力甩摆等串联到一起,探讨的是深空探测领域的前沿问题。通过竞赛,可以使研究生的深空探测知识得到综合应用,提升对问题本质、全面的理解。

(三) 通过竞赛,可以有效训练科研创新能力

轨道设计竞赛仅对最终指标和设计约束等给出了限定,在方法上不做任何限定,既不要求方法传统可靠,也不要方法与众不同,也就是“不管黑猫、白猫,逮住老鼠就是好猫”。当然由于问题设计的复杂性和特殊性,直接套用现有设计工具,并不现实。在这样的限定下,给了参赛者充分的自主空间,能够更好地把握学习和创新的关系。

(四) 通过竞赛,可以有效培养工程任务意识

工程任务意识在研究生培养中是一个很现实的问题。“先谈有无,再看效果”是实际工作中的一个重要原则;“没有最好,只有更好”是实际工程问题的一个重要特点。在研究生初期,往往很难平衡完美化倾向和任务节点之间的关系,不能合理管理自己的有限时间完成具体任务。通过轨道设计竞赛,可以对这一问题有深刻体会,即:一个月时间不长,没有哪个队有把握说自己的结果是最优的。

(五) 通过竞赛,可以有效提高科研综合素质

参加轨道设计竞赛需要开展文献调研、组织协调、编程计算、报告撰写等系列工作,完全相当于一个典型的短期科研任务,可以全面锻炼参赛者的科研素质。

四、专业竞赛在研究生培养中的实践定位

从竞赛组织的情况和竞赛内容来看,轨道设计竞赛是一种面向特定职业人群的专业竞赛,而不是针对在校研究生的竞赛,参加竞赛的团队很多来自世界上顶级的航天工业机构,竞赛目的是推进深空探测领域的科技进步和影响力,培养研究团队而不是培养个人。但在实际参赛来看,来自高校的团队占据了很大比例,这也和实际科研情况类似。如何利用这类专业竞赛进行研究生培养,必然不同于数学建模大赛、“挑战杯”创新设计大赛、大学生机器人大赛等面向学生群体的科技竞赛。在对竞赛特点分析和参赛经验总结的基础上,我们认为要把握好专业竞赛在研究生培养中的定位应注意以下方面:

(一) 专业竞赛可以作为研究生入门阶段到专业阶段的桥梁

对于跨专业研究生来说,在入学初期,由于在专业领域还没有入门,会感觉专业竞赛的题目偏难,难以入手,不能够达到真正训练提高的作用。所以专业竞赛环节需要放到研究生基础课程学习之后,保证他们具有基本的专业基础。另一方面,专业竞赛为了保证参与面的广度,在专

业方面深度有限, 所以并不适合直接作为研究生的论文选题, 仅适合作为一个过渡环节。

(二) 可以把历史上的专业竞赛题目作为早期的专业综合练习

在研究生课程学习阶段, 有一个明确的综合任务可以大大提高课程学习的效率, 而已有的专业竞赛题目可以充当这样的角色。典型的处理方案是在研究生课程学习开始阶段, 就布置一道历史上的专业竞赛题目, 在课程学习阶段结束后, 学生提交并报告结果, 并组织小组讨论和提高。

(三) 应该组织教员、博士生和硕士生的联合团队参加专业竞赛

竞赛需要争先, 从这个角度来说, 为取得好名次, 就应该选择和培养最有经验的人参赛。但是学校是培养人才的地方, 必须要让新手能够适应和提高。另外, 仅为了参赛名次而参赛的意义本身也不大, 不值得长期投入人力。因此, 在组团时, 应该以教员为指导, 以博士生和高年级硕士生为主力, 以低年级硕士生为辅助构成梯队化结构的团队, 合理分工, 实现参赛与人才能力训练的有机结合。如本团队 2010 第一次参加竞赛时以博士生为主, 但有机搭配了硕士研究生, 当年参赛的硕士生经过锻炼后成为 2012 年夺冠的主力队员。

(四) 要建立有效的团队技术积累和传递模式

专业研究不是另起炉灶, 而是在一定基础上的提升, 对团队已有资源的掌握和运用能力是团队能力的重要体现。

(责任编辑: 卢绍华)

(上接第 33 页)

部”, 学生自觉自愿地开展活动。

作为对新技术的跟踪介绍, 结合科研成果的积累, 针对本科生开设了新生研讨课《与物理世界的零距离接触》, 专业研讨课《感知世界与物联天下》, 专业拓展课程《传感网原理》及《传感网与物联网》等课程。这些课程放弃了传统的更多关注知识的授课模式, 而是以能力特别是创新能力的培养为首要教学目标。正如著名物理学家劳厄所说, 重要的不是获得知识, 而是发展思维能力, 教育的成果无非是将一切已学过的东西都遗忘后还留下的东西。^[7]

首先在专业研讨课的开设过程中, 得益于校教育转型创造的宽松环境, 大胆压缩课堂授课时间, 引入“基于任务的协作学习”。^[8]以三人学习小组为单位承担某个研讨主题并主持课堂研讨环节。这些研讨主题均来自科研项目的实施过程, 保证了“任务”的真实性、具体化、可实现。其次, 充分发挥物联网大赛基础功能齐全、开发灵活的特点, 借助实验室的实验器材与开发环境, 进行以三人学习小组为单位的任务设计与实现。小组长担任课题组长, 组织成员构思作品、论证方案、制定进度计划、协调分工。组员担任模块负责人, 对工作进行详细设计并负责实施, 构成了“以任务为主线、教师为主导、学生为主体”的教学活动, 实现了以课程为桥梁的科研与教学资源的有效流通。

三、结束语

本文针对高校创新人才培养的具体方法途径问题, 提出了以创新型学科竞赛为核心, 有机结合科研环境、课程教学与设置构建创新人才培养环境的实践教学模式, 并通

这个前提就是团队应该有一套合理的技术积累模式和技术传递模式。这里所说的技术包括研究方法、研究程序、研究经验等等, 技术积累和传递的手段可以采用文档管理、人员交流等不同的方案, 由团队在实践中凝练。本团队在研究过程中, 积累了大量优化程序库^[7], 为历次竞赛提供了有效的工具软件。

[参考文献]

- [1] 俞理明. 加拿大素质教育结合科学研究的尝试[J]. 外国中小学教育, 2004(6): 9-12.
- [2] 杨荣敏, 王让会, 吴鹏飞. 浅析高校研究生科研创新能力的培养[J]. 教育与教学研究, 2009, 23(12): 65-67.
- [3] 孙爽, 等. 以科技竞赛为载体实施素质教育的研究与实践[J]. 职业教育研究, 2008(11): 142-143.
- [4] 李俊峰, 祝开建. 2005-2009 国际深空轨迹优化竞赛综述[J]. 力学与实践, 2010, 32(4): 130-137.
- [5] 沈红新, 罗亚中, 李海阳. 第四届全国空间轨道设计竞赛冠军团队解法[J]. 力学与实践, 2013, 35(1): 99-101.
- [6] 高扬. 第四届全国空间轨道设计竞赛与第六届国际全局轨道优化竞赛结果与排名[J]. 力学与实践, 2012, 34(6): 95-96.
- [7] 唐国金, 罗亚中, 雍恩米. 航天器轨迹优化理论、方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.

过具体实施论证探索了其可行性和有效性。通过分析各个环节的作用和实施方法, 提出了进一步完善的思路。为使学科竞赛达到预期人才培养效果, 在今后的实践过程中还需做好以下三项工作: (1) 加强科研与教学深度结合。科研向教学的转化不应只停留在教学内容、教学设施的直接转化上; 而要以提升科研在教学过程中对学生的影响力为目标实现深度结合。(2) 重视科研队伍与师资培养。注重指导教师自身发展, 不断探索优秀科研人员向教师的身份转变的有效途径, 是创新人才培养中不可忽视的问题。(3) 营造氛围与创新文化。积极健康向上的校园创新文化环境和学术氛围可以激发学生的各种兴趣, 为学生个性自由发展创造足够的空间。

[参考文献]

- [1][7] 赵娅. 基于任务的协作学习模式研究[D]. 华中师范大学, 2005.
- [2][6] 鲁晓彬. 探索学科竞赛组训模式, 推动院校创新人才培养工作特色发展[J]. 教学研究, 2011(1).
- [3] 殷建平. 关于高层次创新人才培养的几点思考[J]. 高等教育研究学报, 2010, 33(2): 6.
- [4] 蒋瑜. 基于三学期制的研究生创新实践能力培养探讨[J]. 高等教育研究学报, 2010, 33(3): 9.
- [5] 江泽民. 全面建设小康社会, 开创中国特色社会主义事业新局面[M]. 北京: 人民出版社, 2002.
- [8] 约翰·S·布鲁贝克. 高等教育哲学[M]. 杭州: 浙江教育出版社, 2001: 21, 95, 93, 102.

(责任编辑: 卢绍华)