

清华大学优秀博士学位论文丛书



载人登月多段自由返回轨道 及受摄交会问题研究

李京阳 著 Li Jingyang

Research on Multi-Segment Lunar Free-Return Trajectories
and Perturbed Autonomous Rendezvous Guidance Design
for Human Lunar Mission

清华大学出版社
TSINGHUA UNIVERSITY PRESS

清华大学优秀博士学位论文丛书

载人登月多段自由返回轨道 及受摄交会问题研究

李京阳 著 Li Jingyang

Research on Multi-Segment Lunar Free-Return Trajectories
and Perturbed Autonomous Rendezvous Guidance Design
for Human Lunar Mission

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

21 世纪初,美、欧、中相继提出空间探测计划,载人登月被赋予了全新的含义和使命。本书应时代背景,尝试解决工程任务设计中所遇到的轨道动力学问题,研究了精细模型下月球附近交会对接和全方面覆盖变轨策略,提出了全程可自由返回的载人多段自由返回轨道,并确定了地月转移新型轨道设计方案。

本文可作为力学、数学、航空航天等方向的教学、科研及工程技术人员的参考用书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

载人登月多段自由返回轨道及受摄交会问题研究/李京阳著. —北京:清华大学出版社,2018

(清华大学优秀博士学位论文丛书)

ISBN 978-7-302-47798-3

I. ①载… II. ①李… III. ①载人航天器—奔月轨道—研究 ②航天器对接—研究 IV. ①V412.4 ②V526

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 170413 号

责任编辑:陈朝晖

封面设计:傅瑞学

责任校对:刘玉霞

责任印制:董 瑾

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市铭诚印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:155mm×235mm 印 张:11.25 字 数:187 千字

版 次:2018 年 6 月第 1 版

印 次:2018 年 6 月第 1 次印刷

定 价:89.00 元

产品编号:071661-01

一流博士生教育 体现一流大学人才培养的高度(代丛书序)^①

人才培养是大学的根本任务。只有培养出一流人才的高校,才能够成为世界一流大学。本科教育是培养一流人才最重要的基础,是一流大学的底色,体现了学校的传统和特色。博士生教育是学历教育的最高层次,体现出一所大学人才培养的高度,代表着一个国家的人才培养水平。清华大学正在全面推进综合改革,深化教育教学改革,探索建立完善的博士生选拔培养机制,不断提升博士生培养质量。

学术精神的培养是博士生教育的根本

学术精神是大学精神的重要组成部分,是学者与学术群体在学术活动中坚守的价值准则。大学对学术精神的追求,反映了一所大学对学术的重视、对真理的热爱和对功利性目标的摒弃。博士生教育要培养有志于追求学术的人,其根本在于学术精神的培养。

无论古今中外,博士这一称号都是和学问、学术紧密联系在一起,和知识探索密切相关。我国的博士一词起源于2000多年前的战国时期,是一种学官名。博士任职者负责保管文献档案、编撰著述,须知识渊博并负有传授学问的职责。东汉学者应劭在《汉官仪》中写道:“博者,通博古今;士者,辩于然否。”后来,人们逐渐把精通某种职业的专门人才称为博士。博士作为一种学位,最早产生于12世纪,最初它是加入教师行会的一种资格证书。19世纪初,德国柏林大学成立,其哲学院取代了以往神学院在大学中的地位,在大学发展的历史上首次产生了由哲学院授予的哲学博士学位,并赋予了哲学博士深层次的教育内涵,即推崇学术自由、创造新知识。哲学博士的设立标志着现代博士生教育的开端,博士则被定义为独立从事学术研究、具备创造新知识能力的人,是学术精神的传承者和光大者。

^① 本文首发于《光明日报》,2017年12月5日。

博士生学习期间是培养学术精神最重要的阶段。博士生需要接受严谨的学术训练,开展深入的学术研究,并通过发表学术论文、参与学术活动及博士论文答辩等环节,证明自身的学术能力。更重要的是,博士生要培养学术志趣,把对学术的热爱融入生命之中,把捍卫真理作为毕生的追求。博士生更要学会如何面对干扰和诱惑,远离功利,保持安静、从容的心态。学术精神特别是其中所蕴含的科学理性精神、学术奉献精神不仅对博士生未来的学术事业至关重要,对博士生一生的发展都大有裨益。

独创性和批判性思维是博士生最重要的素质

博士生需要具备很多素质,包括逻辑推理、言语表达、沟通协作等,但是最重要的素质是独创性和批判性思维。

学术重视传承,但更看重突破和创新。博士生作为学术事业的后备力量,要立志于追求独创性。独创意味着独立和创造,没有独立精神,往往很难产生创造性的成果。1929年6月3日,在清华大学国学院导师王国维逝世二周年之际,国学院师生为纪念这位杰出的学者,募款修造“海宁王静安先生纪念碑”,同为国学院导师的陈寅恪先生撰写了碑铭,其中写道:“先生之著述,或有时而不章;先生之学说,或有时而可商;惟此独立之精神,自由之思想,历千万祀,与天壤而同久,共三光而永光。”这是对于一位学者的极高评价。中国著名的史学家、文学家司马迁所讲的“究天人之际、通古今之变,成一家之言”也是强调要在古今贯通中形成自己独立的见解,并努力达到新的高度。博士生应该以“独立之精神、自由之思想”来要求自己,不断创造新的学术成果。

诺贝尔物理学奖获得者杨振宁先生曾在20世纪80年代初对到访纽约州立大学石溪分校的90多名中国学生、学者提出:“独创性是科学工作者最重要的素质。”杨先生主张做研究的人一定要有独创的精神、独到的见解和独立研究的能力。在科技如此发达的今天,学术上的独创性变得越来越难,也愈加珍贵和重要。博士生要树立敢为天下先的志向,在独创性上下功夫,勇于挑战最前沿的科学问题。

批判性思维是一种遵循逻辑规则、不断质疑和反省的思维方式,具有批判性思维的人勇于挑战自己、敢于挑战权威。批判性思维的缺乏往往被认为是中国学生特有的弱项,也是我们在博士生培养方面存在的一个普遍问题。2001年,美国卡内基基金会开展了一项“卡内基博士生教育创新计划”,针对博士生教育进行调研,并发布了研究报告。该报告指出:在美国和

欧洲,培养学生保持批判而质疑的眼光看待自己、同行和导师的观点同样非常不容易,批判性思维的培养必须要成为博士生培养项目的组成部分。

对于博士生而言,批判性思维的养成要从如何面对权威开始。为了鼓励学生质疑学术权威、挑战现有学术范式,培养学生的挑战精神和创新能力,清华大学在2013年发起“巅峰对话”,由学生自主邀请各学科领域具有国际影响力的学术大师与清华学生同台对话。该活动迄今已经举办了21期,先后邀请17位诺贝尔奖、3位图灵奖、1位菲尔兹奖获得者参与对话。诺贝尔化学奖得主巴里·夏普莱斯(Barry Sharpless)在2013年11月来清华参加“巅峰对话”时,对于清华学生的质疑精神印象深刻。他在接受媒体采访时谈道:“清华的学生无所畏惧,请原谅我的措辞,但他们真的很有胆量。”这是我听到的对清华学生的最高评价,博士生就应该具备这样的勇气和能力。培养批判性思维更难的一层是要有勇气不断否定自己,有一种不断超越自己的精神。爱因斯坦说:“在真理的认识方面,任何以权威自居的人,必将在上帝的嬉笑中垮台。”这句名言应该成为每一位从事学术研究的博士生的箴言。

提高博士生培养质量有赖于构建全方位的博士生教育体系

一流的博士生教育要有一流的教育理念,需要构建全方位的教育体系,把教育理念落实到博士生培养的各个环节中。

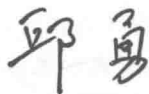
在博士生选拔方面,不能简单按考分录取,而是要侧重评价学术志趣和创新潜力。知识结构固然重要,但学术志趣和创新潜力更关键,考分不能完全反映学生的学术潜质。清华大学在经过多年试点探索的基础上,于2016年开始全面实行博士生招生“申请-审核”制,从原来的按照考试分数招收博士生转变为按科研创新能力、专业学术潜质招收,并给予院系、学科、导师更大的自主权。《清华大学“申请-审核”制实施办法》明晰了导师和院系在考核、遴选和推荐上的权利和职责,同时确定了规范的流程及监管要求。

在博士生指导教师资格确认方面,不能论资排辈,要更看重教师的学术活力及研究工作的前沿性。博士生教育质量的提升关键在于教师,让更多、更优秀的教师参与到博士生教育中来。清华大学从2009年开始探索将博士生导师评定权下放到各学位评定分委员会,允许评聘一部分优秀副教授担任博士生导师。近年来学校在推进教师人事制度改革过程中,明确教研系列助理教授可以独立指导博士生,让富有创造活力的青年教师指导优秀的青年学生,师生相互促进、共同成长。

在促进博士生交流方面,要努力突破学科领域的界限,注重搭建跨学科的平台。跨学科交流是激发博士生学术创造力的重要途径,博士生要努力提升在交叉学科领域开展科研工作的能力。清华大学于2014年创办了“微沙龙”平台,同学们可以通过微信平台随时发布学术话题、寻觅学术伙伴。3年来,博士生参与和发起“微沙龙”12000多场,参与博士生达38000多人次。“微沙龙”促进了不同学科学生之间的思想碰撞,激发了同学们的学术志趣。清华于2002年创办了博士生论坛,论坛由同学自己组织,师生共同参与。博士生论坛持续举办了500期,开展了18000多场学术报告,切实起到了师生互动、教学相长、学科交融、促进交流的作用。学校积极资助博士生到世界一流大学开展交流与合作研究,超过60%的博士生有海外访学经历。清华于2011年设立了发展中国家博士生项目,鼓励学生到发展中国家亲身体验和调研,在全球化背景下研究发展中国家的各类问题。

在博士学位评定方面,权力要进一步下放,学术判断应该由各领域的学者来负责。院系二级学术单位应该在评定博士论文水平上拥有更多的权力,也应担负更多的责任。清华大学从2015年开始把学位论文的评审职责授权给各学位评定分委员会,学位论文质量和学位评审过程主要由各学位分委员会进行把关,校学位委员会负责学位管理整体工作,负责制度建设和争议事项处理。

全面提高人才培养能力是建设世界一流大学的核心。博士生培养质量的提升是大学办学质量提升的重要标志。我们要高度重视、充分发挥博士生教育的战略性、引领性作用,面向世界、勇于进取,树立自信、保持特色,不断推动一流大学的人才培养迈向新的高度。



清华大学校长

2017年12月5日

丛书序二

以学术型人才培养为主的博士生教育,肩负着培养具有国际竞争力的高层次学术创新人才的重任,是国家发展战略的重要组成部分,是清华大学人才培养的重中之重。

作为首批设立研究生院的高校,清华大学自20世纪80年代初开始,立足国家和社会需要,结合校内实际情况,不断推动博士生教育改革。为了提供适宜博士生成长的学术环境,我校一方面不断地营造浓厚的学术氛围,一方面大力推动培养模式创新探索。我校已多年运行一系列博士生培养专项基金和特色项目,激励博士生潜心学术、锐意创新,提升博士生的国际视野,倡导跨学科研究与交流,不断提升博士生培养质量。

博士生是最具创造力的学术研究新生力量,思维活跃,求真求实。他们在导师的指导下进入本领域研究前沿,吸取本领域最新的研究成果,拓宽人类的认知边界,不断取得创新性成果。这套优秀博士学位论文丛书,不仅是我校博士生研究工作前沿成果的体现,也是我校博士生学术精神传承和光大的体现。

这套丛书的每一篇论文均来自学校新近每年评选的校级优秀博士学位论文。为了鼓励创新,激励优秀的博士生脱颖而出,同时激励导师悉心指导,我校评选校级优秀博士学位论文已有20多年。评选出的优秀博士学位论文代表了我校各学科最优秀的博士学位论文的水平。为了传播优秀的博士学位论文成果,更好地推动学术交流与学科建设,促进博士生未来发展和成长,清华大学研究生院与清华大学出版社合作出版这些优秀的博士学位论文。

感谢清华大学出版社,悉心地为每位作者提供专业、细致的写作和出版指导,使这些博士论文以专著方式呈现在读者面前,促进了这些最新的优秀研究成果的快速广泛传播。相信本套丛书的出版可以为国内外各相关领域或交叉领域的在读研究生和科研人员提供有益的参考,为相关学科领域的发展和优秀科研成果的转化起到积极的推动作用。

感谢丛书作者的导师们。这些优秀的博士学位论文,从选题、研究到成文,离不开导师的精心指导。我校优秀的师生导学传统,成就了一项项优秀的研究成果,成就了一大批青年学者,也成就了清华的学术研究。感谢导师们为每篇论文精心撰写序言,帮助读者更好地理解论文。

感谢丛书的作者们。他们优秀的学术成果,连同鲜活的思想、创新的精神、严谨的学风,都为致力于学术研究的后来者树立了榜样。他们本着精益求精的精神,对论文进行了细致的修改完善,使之在具备科学性、前沿性的同时,更具系统性和可读性。

这套丛书涵盖清华众多学科,从论文的选题能够感受到作者们积极参与国家重大战略、社会发展问题、新兴产业创新等的研究热情,能够感受到作者们的国际视野和人文情怀。相信这些年轻作者们勇于承担学术创新重任的社会责任感能够感染和带动越来越多的博士生们,将论文书写在祖国的大地上。

祝愿丛书的作者们、读者们和所有从事学术研究的同行们在未来的道路上坚持梦想,百折不挠!在服务国家、奉献社会和造福人类的事业中不断创新,做新时代的引领者。

相信每一位读者在阅读这一本本学术著作的时候,在吸取学术创新成果、享受学术之美的同时,能够将其中所蕴含的科学理性精神和学术奉献精神传播和发扬出去。



清华大学研究生院院长

2018年1月5日

导师序言

载人登月是人类文明演化至今最为尖端的科技工程之一,它展现的是一个国家强大的科技、政治、军事以及经济实力,彰显的是国家和民族对未知世界探索的强烈渴望。21 世纪初叶,美国 Constellation 计划、欧洲 Aurora 计划以及中国探月工程计划的相继提出,彻底拉开了人类重返外太空的序幕,载人登月也被赋予了全新的含义和使命。探测内容的多样化,轨道设计的复杂精细化,宇航员安全保障的突出化,进一步加大了载人登月工程任务设计的复杂度与难度。本文应时代背景,尝试解决工程任务设计中所遇到的轨道动力学问题,研究了精细模型下月球附近交会对接和全月面覆盖变轨策略,提出了全程可自由返回的载人多段自由返回轨道,并确定了地月转移新型轨道设计方案。

在地月转移新型轨道设计研究中,本文针对地球高纬度再入提出基于拱线偏置的返回轨道设计方案,确定了影响再入点方位和再入航程的主要设计参数;改进了圆锥曲线拼接模型下影响球处轨迹状态求解算法,合理避开影响球处初值猜测,减少了数值修正,提高了计算效率。

在多段自由返回轨道研究中,本文强调轨道设计的灵活度和故障返回的可行性。经典自由返回轨道设计难度大、发射窗口窄,无法有效保证光照和测控条件的满足;Hybrid 轨道虽设计灵活、窗口较宽,但牺牲了安全属性;多段自由返回轨道的设计有兼收并蓄的特点,轨道设计不仅灵活且满足无动力故障返回的要求。本文在圆锥曲线拼接模型下完成多段轨道定义,在次高精度伪状态模型下,完成轨道解析建模与特性分析。数值计算表明,伪状态模型误差仅为圆锥曲线拼接模型误差的 10%。

在月球附近交会对接控制策略研究中,本文强调规划算法的精确性与时效性。提出三步迭代法,完成控制策略由 C-W 模型、二体模型到高精度

模型的演化,并比对遗传算法,证明了三步迭代法的最优性。引入 J_2 摄动模型,完成局部最优控制策略的解析构建,显著减小了因 C-W 模型不精确带来的法向变轨误差,并有效避免了因多步迭代带来的时间损耗。数值计算表明,交会终端位置误差仅为 C-W 模型的误差的 1%;脉冲近似解可有效转变为有限推力解。

在全月面覆盖控制策略研究中,本文关注规划算法的合理性与故障返回的可行性,提出了基于多段自由返回轨道的多脉冲控制策略。数值仿真表明,全月面覆盖所需总脉冲消耗小于 2.6km/s ,多段中途转移脉冲消耗小于 0.4km/s 。

宝音贺西

清华大学航天航空学院

2017 年 9 月于清华园

主要符号对照表

A_m	探测器面质比
a	轨道六根数向量
a, b	半长轴和半短轴
C_R	太阳辐射系数
c	$m \times 1$ 阶约束向量
c_l	光速
d	第 6 章中 $m \times 1$ 阶不等式约束, 在优化算法中表示迭代步长
d	第 6 章中微分符号
e, e	偏心率矢量和偏心率
f	真近点角, 第 5 章和第 6 章中表示交会终端状态
h, m, n, g	第 7 章中角动量矢量与其分量
h	距离目标天体的高度
i	轨道倾角
J	Jacobi 矩阵
J	目标函数
J_2	中心天体的第二阶非球形摄动
L_s	太阳发光度
M	平近点角
m	中心天体质量
N	节线矢量
$\hat{P}$	偏心率的单位矢量
$\hat{Q}$	半通径的单位矢量
R	旋转矩阵
r, x, y, z	中心天体坐标系下航天器位置矢量和分量
r	航天器距中心天体半径
r_{EM}, v_{EM}	地球 J2000 坐标系下月球相对地球的位置和速度矢量

T	轨道周期
t	时间
u	纬度幅角
$v, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$	中心天体坐标系下航天器的速度矢量和分量
X	航天器相对状态矢量
x	$n \times 1$ 阶自由参数矢量, 第 6 章中表示相对状态矢量
α_i	第 i 次脉冲到交会终端的相位角
δ	变分符号
γ	航天器的飞行角
$\Delta v, \Delta v$	脉冲矢量与大小
ε	预先给定的误差
μ	中心天体的引力常数
Φ	状态转移矩阵
Ω	升交点赤经
ω	旋转坐标系角速度矢量
ω	近地点幅角或轨道角速度

下标

a	远中心天体点
ar	月球到达时刻
C	Cauchy 算法
c	绕月状态
E	地球
e	外部伪状态标示符
GN	Gauss-Newton 算法
I, i	第 4 章中相对地球和月球的内部伪状态标示符
j	奔月点火状态
M/m	月球
new	替换值
o	地球停泊轨道
p	近中心天体点
r	返回状态
re	再入状态

S	第 3 章中表示太阳,第 7 章中表示航天器
s, se	月球影响球入口点和出口点
TR	Trust-Region Dogleg 算法
tl	奔月状态
v	中途转移脉冲
x, y, z	惯性坐标系的 x 轴、 y 轴和 z 轴
β	第 7 章中目标轨道与近月双曲轨道交点
0	标称值
1	第 3 章中 PTOPT 奔月段自由返回轨道
2	第 3 章中 LOP 绕月段自由返回轨道
(2)	反正切函数

上标

r	径向
t	横向
z	法向
κ	第 7 章中月心双曲轨道坐标系
τ	第 7 章中月球目标轨道坐标系
$\hat{\cdot}$	单位矢量
*	相对地球 J2000 坐标系的月心段状态矢量

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 研究现状综述	3
1.2.1 载人登月轨道研究	3
1.2.2 地-月间转移轨道研究	6
1.2.3 地球和月球附近交会对接	7
1.2.4 全月面覆盖	9
1.3 本文的工作和创新点	10
1.3.1 本文的工作	10
1.3.2 主要创新点	11
第 2 章 月球探测器转移轨道和发射窗口特性	13
2.1 引言	13
2.2 地月引力空间转移轨道解析模型	14
2.2.1 地月引力场模型	14
2.2.2 地-月转移轨道设计	14
2.2.3 月-地转移轨道设计	18
2.3 地-月间发射窗口	21
2.3.1 地球出发窗口	21
2.3.2 月面上升窗口	24
2.3.3 月球返回窗口	25
2.4 高精度模型修正	28
2.5 本章小结	31
第 3 章 载人登月多段自由返回轨道	33
3.1 引言	33

3.2	多段自由返回轨道	34
3.2.1	轨道定义	34
3.2.2	多段自由返回轨道构建	35
3.2.3	中途转移脉冲	45
3.3	多段自由返回轨道特性分析	49
3.3.1	轨道特性	50
3.3.2	发射窗口	55
3.4	高精度模型修正	63
3.5	本章小结	66
第4章	基于伪状态理论高精度多段自由返回轨道	69
4.1	引言	69
4.2	伪状态理论	70
4.3	伪状态模型下多段自由返回轨道设计	71
4.3.1	奔月段自由返回轨道	71
4.3.2	Quasi-Lambert 问题	74
4.3.3	绕月段自由返回轨道	76
4.3.4	初值修正	77
4.4	绕月段与月球返回段轨道特性	79
4.5	高精度模型下数值评估	83
4.6	本章小结	88
第5章	月球着陆器自主交会对接变轨策略规划	89
5.1	引言	89
5.2	交会对接线性化模型	90
5.2.1	相对运动状态转移矩阵	91
5.2.2	初始与末端条件	92
5.2.3	交会对接方程组	94
5.3	多模型迭代	97
5.4	数值仿真	99
5.5	本章小结	105
第6章	考虑 J_2 摄动月球附近交会对接局部最优控制	107
6.1	引言	107

6.2	受摄相对运动状态转移矩阵	108
6.3	交会对接变轨策略优化	109
6.3.1	目标函数与约束	109
6.3.2	解析梯度推导	110
6.3.3	目标函数与过程以及终端约束梯度	112
6.4	数值仿真算例	114
6.4.1	简化的 Gim-Alfriend 状态转移矩阵精度	114
6.4.2	交会对接过程优化算例	116
6.4.3	有限推力模型下变轨策略	118
6.4.4	交会对接轨迹分析	120
6.5	本章小结	122
第 7 章	全月面覆盖变轨策略	123
7.1	引言	123
7.2	多段自由返回轨道	124
7.2.1	限制性三体模型	124
7.2.2	轨道一般特性	125
7.3	全月面覆盖变轨策略规划	127
7.3.1	二体模型下变轨策略规划	127
7.3.2	高精度模型下修正	130
7.4	数值仿真算例	131
7.5	本章小结	134
第 8 章	结论	135
8.1	研究总结	135
8.2	展望	137
参考文献		139
附录 A	Trust-Region Dogleg 算法	153
附录 B	简化的 Gim-Alfriend 状态转移矩阵	155
致谢		161