

第三届全国深空轨道设计竞赛总结

陈 杨^{*,1)} 唐歌实^{†,**} 李 黎^{†,**} 宝音贺西^{*} 李俊峰^{*}

^{*}(清华大学航天航空学院, 北京 100084) [†](北京航天飞行控制中心, 北京 100094)

^{**}(航天飞行动力学技术重点实验室, 北京 100094)

摘要 介绍了第三届全国深空轨道设计竞赛的题目和评价标准。总结了各队的设计方法、设计结果排名以及获得的启示。

关键词 深空轨道设计竞赛

全国深空轨道设计竞赛由中国力学学会和清华大学航天航空学院发起并主办首届(2009年)竞赛^[1]。按照惯例, 每届冠军队主办下届竞赛。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和第二届竞赛冠军清华大学航天航空学院联合主办。

本届竞赛报名通知于2011年2月1日发布, 共有25支来自全国各高等学校和科研院所的队伍报名参赛。3月10日发布竞赛题目, 要求参赛队于2010年5月15日提交设计结果。本次竞赛题目的背景为多目标、多任务深空探测飞行轨道优化设计, 紧密结合我国未来可能开展的深空探测任务。最终共有11支参赛队提交了设计结果, 经过主办方的轨道复核, 确定了其中10支参赛队结果有效, 其中, 中国科学院空间应用工程与技术中心(筹)代表队获得冠军, 中国科学院紫金山天文台与南京大学天文系联合代表队获得亚军, 西安卫星测控中心宇航动力学国家重点实验室代表队获得季军, 国防科技大学航天与材料工程学院、解放军信息工程大学 and 西北工业大学航天学院等7支代表队获得优胜奖。

1 竞赛题目与评价标准

1.1 题目描述

我国在顺利实施绕月探测, 并按规划启动后续“落月、采样返回”任务的同时, 随着国力的增强, 开展进一步走向深空的航天活动是中国未来航天领域发展的必然选择。未来30年我国将逐步开展火星、金星、小天体和其他深空探测项目。由于深空探测任务持续时间长、成本高, “多目标、多任务”的深空探测越来越引起世界各航天大国的重视。本次竞赛题目的应用背景为太阳系八大行星和小天体探测, 探测目标以太阳系八大行星为主, 同时以小行星作为次要探测目标。

探测器总质量3500 kg, 其中燃料3000 kg, 于规定时间窗口2015年1月1日~2025年12月31日中的某一时刻由运载火箭发射从地球出发, 出发时刻认为探测器的日心位置在误差允许范围内与地球相同, 运载火箭最大可为探测器提供大小为3 km/s的逃逸速度, 方向任意选择。从太阳系八大行星(地球不作为本次竞赛的探测目标)以及主办方提供

的小行星中随意选择目标依次探测。对八大行星的探测有两种形式: 交会驻留和飞越, 交会时探测器的日心位置速度在允许的误差范围内与交会目标大行星相同, 驻留时间不得小于规定的最小驻留时间, 驻留每颗大行星期间探测器均释放20 kg不回收的科学探测设备, 即探测器干重减少20 kg, 同时会消耗特定质量的燃料用于相对行星的捕获和逃逸。飞越探测大行星时要求探测器的位置在允许的误差范围内与飞越目标大行星相同, 速度不同。可以考虑大行星的引力辅助效应, 即飞越的瞬时获得大行星引力辅助所产生的速度增量。对小行星的探测任务为近距离飞越, 飞越时探测器的日心位置在允许的误差范围内与飞越目标小行星相同。

多次完成对同一目标的同类型探测任务不重复计分(对于每颗大行星, 交会驻留只能完成一次, 同一颗大行星的飞越可多次进行, 但只有第一次飞越加分, 其余可考虑为引力辅助。交会驻留或飞越地球不计分。同一颗小行星多次飞越只有第一次加分)。探测器的所有飞行任务必须在20年内完成。

探测器的推进系统可以采用两种方式中的一种: (1) 小推力的电推进, 推进比冲3000 s, 推力最大值0.3 N, 推力大小和推力方向需要优化选取, 电推进发动机可任意开启和关闭; (2) 大推力的化学推进, 推进比冲500 s, 每次推进简化为瞬时速度脉冲, 每次速度脉冲的大小和方向需要优化选取, 施加速度脉冲的时刻和次数没有限制。在最终提交的结果中, 每支参赛队伍只允许采用其中一种推进方式。

为了纪念中国航天事业的奠基人钱学森先生诞辰100周年, 飞越“钱学森星”(主带小行星, 永久编号3763)将得到额外的加分。

1.2 评价标准

首先, 参赛队的设计结果需要在竞赛截止日期之前提交, 并且经过主办方的轨道复核没有违反任何约束条件, 严重违反约束条件或在截止日期之后提交的结果不计入排名。在结果检验正确的基础上, 评价标准为最大化所有探测天体的得分累加之和, 即

$$J = \sum \alpha_i \quad (1)$$

其中, α_i 为探测第 i 个天体的得分。结合我国深空探测的实际情况, 各天体的探测得分根据其所受关注程度和题目要求制定, 具体得分如表1。

本文于2012-01-10收到。

1) E-mail: chen yang.thu@gmail.com

表1 探测各天体得分情况

天体	探测形式	得分
大行星	交会并驻留	12
大行星	飞越	6
小行星钱学森星	飞越	7
其余小行星	飞越	1

另外,若存在得分相同的情况,结束任务时探测器剩余燃料质量大者为优。

1.3 题目说明

当前,深空探测越来越受到世界各航天大国的关注,火星表面探测^[2-4]、近地小行星取样返回探测^[5-6]、主带小行星探测^[7]和木星及其卫星探测^[8]都是当前和未来深空探测活动的重点。我国当前也在进行未来20年包括火星探测、小行星探测、太阳极区探测和木星探测等深空探测任务的总体规划与论证工作。深空探测任务为了在控制成本的同时获得更大的科学和工程回报,通常选择多目标、多任务的探测方式,而这也是我国目前尚未涉及的领域,很多问题亟待解决。本次竞赛以此为背景,希望能够促进我国相关研究的开展。

深空探测比较成熟的推进方式有化学推进和电推进两种。化学推进推力大、比冲小,变轨效果可以等效成速度脉冲,轨道设计采用圆锥曲线拼接法。电推进发动机推力小、比

冲高、作用时间长,轨道设计分为全局粗略优化设计和局部小推力轨道求解两步。两种推进方式在深空探测任务中都各有优势和特点,本次竞赛参赛队可以自行选择推进方式进行设计。

深空探测目标通常与地球相距较远,转移所需能量较大。为了降低燃料消耗,很多深空探测任务都需要借助于行星引力辅助技术来实现。引力辅助又称借力飞行、甩摆或行星近旁转向,指有意设计深空探测器的轨道经过行星附近并利用行星引力对其进行加速、减速或转向,使其朝着更有利于接近目标的方向前进。本次竞赛规定参赛队可以使用太阳系各大天体的行星引力辅助技术,寻找有效的引力辅助次序和时机,是实现太阳系多目标多任务探测的关键之一。

为了纪念我国航天之父钱学森先生,本次竞赛特将钱学森星列为探测目标之一。钱学森星是一颗位于火星与木星之间的主带小行星,钱学森星作为目标天体也使得本次竞赛的探测目标包含了大行星、近地小行星和主带小行星等太阳系内的各主要天体。

2 竞赛结果与排名

竞赛发布题目以后,经过大约2个月的努力,共有11支参赛队提交了设计结果。经过主办方的轨道数据复核,共有10支参赛队的结果有效,1支参赛队结果违反约束,具体结果和排名情况见表2。

表2 第三届全国深空轨道设计竞赛设计结果与排名

名次	单位	推进方式	造访天体	燃料剩余量/kg	得分
1	中国科学院空间应用工程与技术中心(筹)	EP	金星(R&F)、火星(R&F)、木星(R)、水星(R&F)、钱学森星、小行星(15)	8.69	88
2	南京大学天文系与中国科学院紫金山天文台	EP	金星(R&F)、火星(R&F)、水星(F)、木星(R)、钱学森星、小行星(14)	156.11	75
3	西安卫星测控中心宇航动力学国家重点实验室	EP	金星(R&F)、火星(R&F)、水星(F)、钱学森星、小行星(26)	71.88	75
4	国防科技大学航天与材料工程学院	EP	金星(R&F)、火星(R&F)、木星(R)、钱学森星、小行星(18)	334.90	73
5	解放军信息工程大学测绘学院	CP	金星(R&F)、火星(F)、木星(F)、钱学森星、小行星(4)	39.11	41
6	西北工业大学航天飞行动力学技术重点实验室	CP	金星(F)、火星(F)、木星(F)、钱学森星	230.19	25
7	西北工业大学航天学院1队	CP	金星(F)、火星(R)、钱学森星	10.56	25
8	南京航空航天大学航天学院1队	EP	小行星(20)	5.04	20
9	南京航空航天大学航天学院2队	EP	小行星(19)	12.06	19
10	西北工业大学航天学院2队	CP	火星(R)、木星(F)	53.2	18
*	北京航空航天大学宇航学院	EP	金星(R)、火星(F&R)、水星(F)	524.9	36

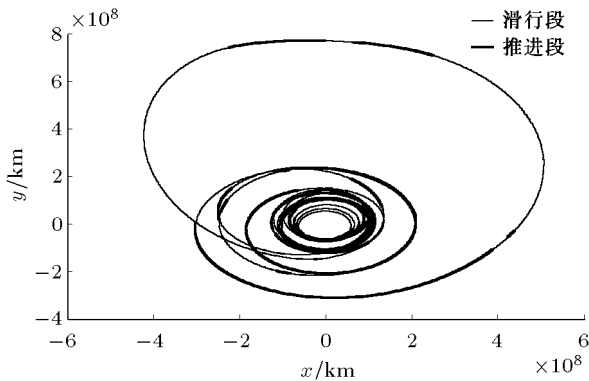
注: EP表示电推进, CP表示化学推进。大行星后的字母R表示交会并驻留探测, F表示飞越探测, 小行星后的数字表示小行星探测个数。*表示违反约束条件, 不计入排名。

3 各队设计方法

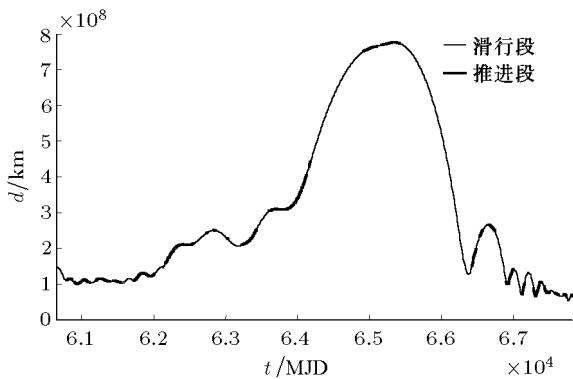
本节对参赛队的设计思路与方法进行简要的介绍. 由于篇幅所限, 只给出前 3 名和化学推进指标最优的第 5 名的设计方法. 方法介绍与轨道数据均摘自各队提交的说明文档和轨道数据文件.

3.1 冠军 (中国科学院空间应用工程与技术中心 (筹)) 设计方法

考虑到科学意义以及分值情况, 选择大行星交会与飞越作为轨道设计的主线, 同时兼顾飞越小行星. 根据轨道能量首先明确了地球-金星-火星-钱学森星-木星-水星的交会顺序. 轨道设计时, 先确定火星-钱学森星-木星的飞行窗口, 以此为依据, 对地球-金星-金星-火星-木星-水星的飞行轨道进行设计, 最终将各段轨道拼接在一起. 为了降低交会行星与从行星出发所需的燃料, 使用了引力辅助, 特别地, 全局搜索过程中为了解决转移相位是 π 或 2π 时 Lambert 问题计算结果脉冲较大的情况, 提出了滑行-Lambert 问题模型. 对于飞越小行星的轨道设计, 主要采用两种方法: 一是局部轨道重新设计以飞越更多小行星; 二是在已有的飞行轨道基础上逐点搜索距离较近的小行星. 局部小推力轨道优化采用混合法, 为了快速寻优, 去除横截条件约束, 假定发动机开关顺序, 去除开关函数约束, 将推力大小设为过渡优化变量. 图 1(a) 为轨道示意图, 图 1(b) 为日心半径变化图.



(a) 轨道示意图

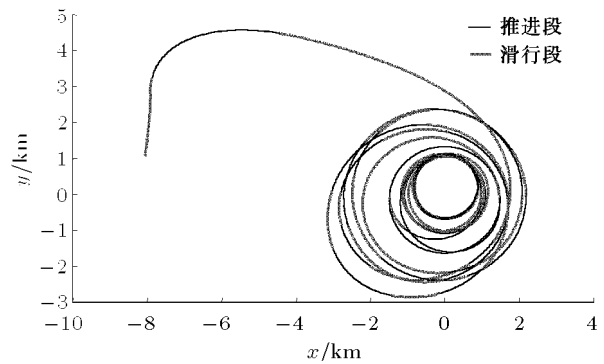


(b) 日心半径变化图

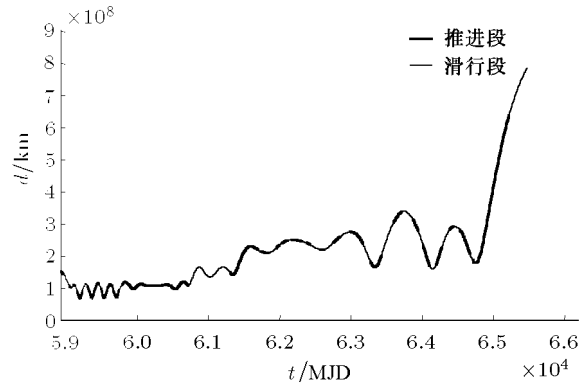
图 1 冠军参赛队设计结果

3.2 亚军 (中国科学院紫金山天文台与南京大学天文系) 设计方法

以大行星交会驻留探测为主要任务, 兼顾小行星飞越探测. 采用分支定界法结合引力辅助技术进行全局粗略优化. 先确定了先内后外的探测方式, 轨道设计的主线为地球出发-金星驻留-火星驻留-木星驻留. 轨道分为地球到金星、金星到火星和火星到木星分段优化, 地球到金星的过程中结合金星与水星的飞越, 金星到火星过程中利用地球和火星的引力辅助, 火星到木星中途飞越钱学森星. 使用间接法求解小推力轨道优化问题, 引入了同伦求解技术, 从能量最优问题迭代求解燃料最优问题. 提出了将小推力轨道在已知的无摄动二体轨道附近线性展开的方法猜测协态变量的初值, 得到了较好的计算效率. 图 2(a) 为轨道示意图, 图 2(b) 为日心半径变化图.



(a) 轨道示意图

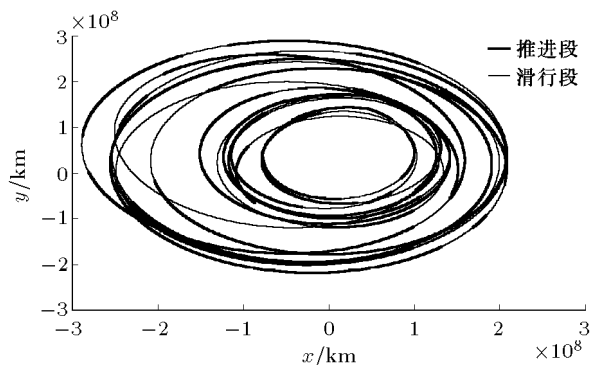


(b) 日心半径变化图

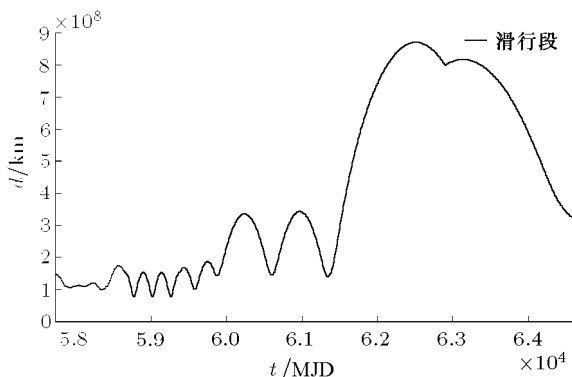
图 2 亚军参赛队设计结果

3.3 季军 (宇航动力学国家重点实验室) 设计方法

与大多数参赛队设计思路不同, 季军队轨道设计以小行星飞越为主, 共飞越了 26 颗小行星, 交会驻留金星与火星. 采用分支定界法大规模搜索探测序列, 搜索过程中保留较好的序列, 去除掉不符合要求的序列, 粗略筛选准则选定是脉冲搜索结果的速度增量与小推力能够产生的速度增量相当. 小推力局部优化采用同伦求解技术, 引入开关函数检测得到推力切换点, 将推进段和滑行段分开积分以保证精度. 为了解决协态变量初值猜测敏感的问题, 采用了协态变量初值归一化技术. 图 3(a) 为轨道示意图, 图 3(b) 为日心半径变化图.

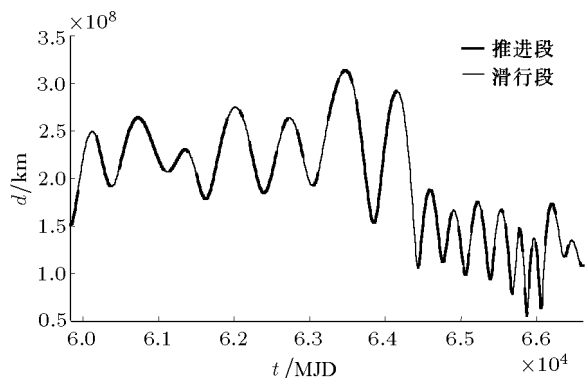


(a) 轨道示意图



(b) 日心半径变化图

图4 第5名参赛队设计结果

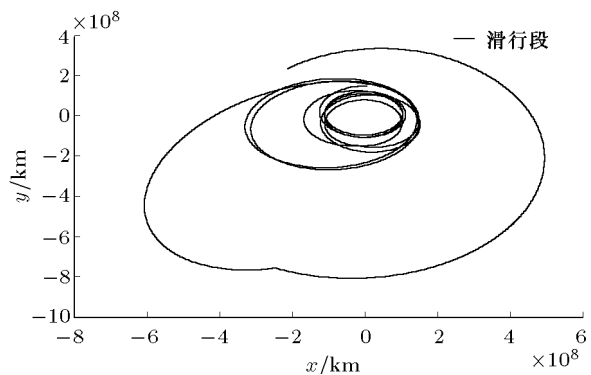


(b) 日心半径变化图

图3 季军参赛队设计结果

3.4 第5名(信息工程大学测绘学院)设计方法

综合使用多次引力辅助,得到了化学推进参赛队中最好的结果.设计思路以大行星探测为首要设计目标,交会天体选择金星或火星,引力辅助天体主要考虑地球、金星和木星.由于木星距离较远,首先设计地球至木星的轨道段.参考伽利略号的飞行轨道,将地球出发时间选在2029年附近.以地木轨道为基础,双向拓展,向外飞越钱学森星,向内拓展找到了飞越火星的轨道.大行星探测轨道确定后,对轨道进行微调来设计小行星飞越轨道.图4(a)为轨道示意图,图4(b)为日心半径变化图.



(a) 轨道示意图

4 本次竞赛中得到的启示

根据各队的设计结果,多目标、多任务深空探测任务具有一定的可行性.各参赛队给出的结果中大都设计了以不同造访方式的针对火星、金星和近地小行星的多目标探测任务,说明以当前技术条件,基本上能够以较低代价实现针对这些近地天体的探测.虽然本次竞赛所考虑的模型还不完整,也忽略了很多重要的工程约束,但作为任务的初步轨道设计,竞赛结果能够为我国未来的深空探测任务规划与论证提供重要参考.

竞赛前4名参赛队均采用电推进作为推进方式,这说明电推进在深空探测任务中具有一定的优势.目前世界各航天大国都在加紧研发电推进发动机并应用于深空探测任务,我国未来有可能进行的近地小行星探测和主带小行星探测任务也都计划使用电推进作为主推进方式,但我国目前的研究基础尚显薄弱,希望国家相关部门对此能够提高重视程度并加大投入.电推进航天器的轨道设计实际上是求解最优控制问题.方法可分为直接法、间接法和混合法^[9],这些方法均各自存在优点与不足.另外,在全局粗略优化时,各队均基于脉冲假设的求解 Lambert 双脉冲转移问题来近似小推力轨道.是否存在更有效的全局寻优方法是值得深入研究的问题.

引力辅助技术能够有效地节省深空飞行所需燃料,从而大大降低任务成本,是多目标、多任务深空探测的必然选择.以本次竞赛为例,几乎所有参赛队均采用了引力辅助技术.但结合引力辅助技术的轨道设计是存在大量局部最优解的优化问题,引力辅助序列和时机的选择在国际上也是尚未完全得到解决的问题.同时,由于我国还没有采用引力辅助的飞行任务,在引力辅助轨道设计,尤其是精确动力学模型中的轨道设计方面研究较少.

虽然经过精心的考虑与验算,但由于主办方的水平有限以及时间仓促,题目中尚存在一些不足,例如对大行星交会驻留的处理方式值得进一步斟酌.全国深空轨道设计竞赛的举办初衷是促进我国深空探测轨道设计领域的研究、广泛交流、开拓思路、共同提高,为我国未来深空探测任务储备技术力量.第四届全国深空轨道设计竞赛将于2012年由中国科学院空间应用工程与技术中心(筹)、北京航天飞行控制中

心、航天飞行动力学技术重点实验室与国防科学技术大学联合主办，继续努力推动我国深空探测轨道设计技术的研究与发展。

致谢 对所有报名的参赛队表示衷心感谢！对所有提交设计结果的大学与科研院所表示特别感谢：中国科学院空间应用工程与技术中心（筹）、南京大学天文系、中国科学院紫金山天文台、西安卫星测控中心宇航动力学国家重点实验室、国防科技大学航天与材料工程学院、解放军信息工程大学测绘学院、西北工业大学航天学院、南京航空航天大学航天学院、北京航空航天大学宇航学院。

参 考 文 献

- 1 高扬, 祝开建, 李恒年等. 第二届全国深空轨道设计竞赛总结. 力学与实践, 2011, 33(2): 116-123
- 2 Golombek MP, Cook RA, Economou T, et al. Overview of the mars pathfinder mission and assessment of landing site predictions. *Science*, 1997, 278(5344): 1743-1748
- 3 Way DW, Powell RW. Mars science laboratory: entry,

- descent, and landing system performance. 2006 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 2006
- 4 Kersteina L, Bischofa B, Renkena H, et al. Micro-mars: A low-cost mission to planet mars with scientific orbiter and lander applications. *Acta Astronautica*, 2006, 59: 608-616
- 5 Kawaguchi J, Uesugi K, Fujiwara A. The MUSES-C mission for the sample and return-its technology development status and readiness. *Acta Astronautica*, 2003, 52: 117-123
- 6 陈杨, 宝音贺西, 李俊峰. 我国小行星探测目标分析与电推进轨道设计. 中国科学: 物理学·力学·天文学, 2011, 41(9): 1104-1111
- 7 Dankanich JW, Landau D, Martini MC, et al. Main Belt Asteroid Sample Return Mission Design. In: 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 25-28 July, Nashville, TN, AIAA 2010-7015
- 8 D'Amario LA, Byrnes DV. Interplanetary Trajectory Design for the Galileo Mission. AIAA 21st Aerospace Sciences Meeting, Reno, Nevada, Jan 10-13, 1983
- 9 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

第八届全国周培源大学生力学竞赛（团体赛）

——四川大学代表队设计方案介绍

朱亚路* 黎善武† 胡延超†

* (四川大学建筑与环境学院工程力学系, 成都 610065)

† (四川大学水利水电学院水利水电工程系, 成都 610065)

摘要 简要介绍了四川大学代表队在第八届全国周培源大学生力学竞赛（团体赛）中的纸桥过车、超载检测、定时下落、图形变换 4 个项目的方案设计过程，并描述了各自的比赛效果，同时对各个项目的不足和可改进之处提出了看法。

关键词 力学竞赛, 方案设计

在 2011 年 8 月 17~19 日进行的第八届全国周培源大学生力学竞赛（团体赛）中，四川大学代表队以优异的成绩获得了特等奖。四川大学代表队在纸桥过车、超载检测、定时下落、图形变换 4 个项目的设计与制作中均按照“研究题目-讨论方案-制作修正-调试”的步骤来实施。下面对四川大学代表队 4 个比赛项目的方案设计进行简要的介绍。

1 纸桥过车

该题目的难度在于仅使用 A4 纸（不使用任何粘接材料）制作一座纸桥使质量 0.65 kg 的小车安全通过。在先保证小车安全通过，再考虑减轻纸桥质量的前提下，初步拟定了 3 种可行方案：一是利用纸的抗拉能力优于抗弯能力的特性，制作一个由纸带构成的索桥；二是对纸张进行简单加工制成纸

筒提高抗弯能力，做成刚性较大的筒支桥；三是做成具有初始挠度的拱桥。方案 1 使用的纸张较少，但可能刚度不足，同时桥体两端在桌面上的固定存在困难，方案 3 尽管在结构上具有一定的优势，但拱桥制作难度较大，不易操作。因此，我们选择了方案 2。

为确定纸筒的最佳构型，通过手压方式对不同粗细纸筒的抗弯能力做了简单的估测，决定采用食指粗细的纸筒。考虑到真正承重的是车轮所压的两边，纸桥只需制作两边车轮部分即可。为防止小车行至中间时桥的端部从桌上滑下，需增加桥长。这样得到了最终方案：制作两个长 130 cm 分别由两根纸筒绑在一起组成的长杆供车子通过，长杆由短纸筒首尾连接而成，每一处至少保证有两张纸叠加，所有纸筒用宽度约为 0.5 cm 的纸带绑紧。最后根据等强度理论，在桥中部 60 cm 处额外捆绑了一个略细的纸筒。同时为防止车轮的侧向作用力使两根桥杆变形分开，在桥的中部及两端各绑了一个纸筒使其形成一个整体（图 1）。改进后经测试小车安全通过。

比赛中小车一次性通过，纸桥没有发生过大变形，称重

2011-09-26 收到第 1 稿, 2011-10-19 收到修改稿。