

# 为地月旅行打造精品攻略

## ——揭秘北京飞控中心高密度测控协同和动态规划技术

本报记者 付毅飞 本报通讯员 姜宁 祁登峰

为应对探月工程三期再入返回飞行试验器历时8天多、总航程达80多万公里的地月旅行,北京航天飞行控制中心突破掌握了高密度测控协同和动态规划技术,打造出一份准确详细、又能灵活调整的精品攻略——“标称计划”。

其诞生并非易事。该中心任务规划计划岗位主任设计师彭德云说:“制定计划的基础是分析清楚测控协同信息。光照、姿态、测控条件、指令数量、发令时机……需要考虑的因素太多了。各种状态交叉揉和,多种约束并行存在,对制定标称计划来说是一个巨大的挑战。”

以密集发令为例,彭德云说,去年嫦娥三号任务中,着陆器和巡视器两器分离阶段要在七八个小时内发出600多条指令,而且条条

事关任务成败,必须判明状态,多方确认才能发出。这是地面科技人员最紧张、最辛苦的一段时间。

而本次任务中,飞行试验器从启程奔月到再入安全返回,全靠标称计划引导,共有6000多条天地协同事件,几乎全程都在密集发令。

时间紧张、状态复杂,标称计划该如何安排?

彭德云却不担心,“这次我们有了‘杀手锏’。”

他指的是该中心最新突破掌握的高密度测控系统和动态规划技术。这项技术包含一种崭新的规划计划设计思想——锚点联动分层设计;一套新研软件系统——预报合成显

示输出系统。

他介绍,锚点联动分层设计是将标称计划中相关联的指令事件分层规划并设置锚点标识。这样在排计划或者修改计划时不但条目清晰,而且能实现联动修改,大幅降低计划调整所带来的任务风险。“就像一盘

混杂在一起的针,外形一样,材质不同。要把铁针筛选出来,最好的办法就是拿一块磁铁把所有的铁针吸附上来。”他说,“锚点标识就是这块磁铁。”

预报合成显示输出系统的软件界面上,各方向测站信息、跟踪约束、测控条件等都非

常直观。不论要分析多少约束条件下、何种测站配置下、什么任务状态下的测控协同信息,只要在软件上设置相应参数,很快就能在软件图表显示界面实现。该中心总师周建亮说,现在的多目标任务测控网状态复杂、飞行时间长、控制事件密集,如果仅靠人工来分析测控协同信息,几乎不可能完成。有了这套软件,就能将抽象的信息数据图形化,将虚拟的约束条件直观化,大幅度提高了测控协同分析的效率,以及标称计划的准确性。

周建亮介绍,以前碰到要临时更改任务状态的情况,要完成调整修改一般要花费几个小时甚至几天的时间。现在遇到大规模调整也不用了一个小时,小范围调整只需几分钟就能完成,而且经过软件的智能自动检测,出错概率基本为零。

# 中国牵引

## ——南车株洲所城轨关键设备自主开发纪实

本报记者 冷德熙

### 创新驱动与城市轨道交通国产化15周年

今年9月,中国南车株洲电力机车研究所(下称“株洲所”)旗下时代电气公司一举击败国内外众多强劲竞争对手,拿下北京市场66列400辆地铁列车电气牵引系统5亿元订单。这是该公司在北京市场中标房山线、7号线牵引系统之后的又一次重大斩获,体现了自主牵引系统在国内北、上、广、深一线市场的影响力,为国内外同行树立了新的标杆。

株洲所是国内从事电力牵引系统开发生产的应用型研究所,拥有50多年的从业历史。我国京沪高铁曾跑出时速486.1公里的世界铁路最高运营速度,其牵引和网路控制系统就是株洲所提供的。2007年我国高速动车组投入运营以来,株洲所提供了其中半数以上的牵引电传动和网路控制系统。

就是这样一家在轨道交通行业具有辉煌历史的企业,在本世纪初,将自主开发的城轨列车牵引系统,面向地铁、轻轨等城市轨道交通领域进行推广应用的时候,却遭遇了不小的尴尬。

### 鸡生蛋还是蛋生鸡? 城轨交通自主化牵引系统的市场遭遇

株洲所时代电气公司与北京、上海等城市渊源颇深,株洲所始终感谢这些城市的地铁建设管理和运营部门,对于自主创新电气牵引系统推广应用的每一次支持和助力。“没有业主的支持和助力,关键核心技术的国产化和自主化几乎是不可能的”,株洲所副总经理、总工程师冯江华说。

1999年,国务院办公厅转发国家计委《关于城市轨道交通设备国产化的实施意见》,提出支持发展国家轨道交通装备制造业的“国产化”政策,同时指定一批企业和科研院所作为相关技术装备的研制出口单位。当时的株洲所就是城市轨道交通车辆牵引系统的研制生产和出口部门。

但是,国家《招投标法》规定,任何城市轨道交通装备的生产企业参加工程招标之前,必须有成功的工程业绩。没有业绩,任何单位不得参加工程的设备竞标。相对于刚刚兴起的中国城市轨道交通事业来说,当时许多设备生产商都没有业绩。

对于中国的相关企业来说,要有业绩就必须首先参加工程竞标;不让参加竞标就永远不会有成功的工程业绩。这就像一个古老的哲学命题,有了鸡才有蛋,但是鸡又是鸡蛋孵出来的,有蛋才有鸡。

必须找到新的办法。不然,国产设备就没有出头之日。当时推进地铁电牵引系统的国产化已经成为业内共同的心声,注意到当时的北京地铁管理部门正在培育本地车辆制造企业,

当时的株洲所负责人向有关单位发出倡议,有关主机厂和设备系统研制单位应该和业主开展合作,在业主单位支持下开展自主轨道交通关键设备的生产、考核和试运行。

据冯江华回忆,倡议在当时得到多方响应,最后大家研究决定,由北京地铁建设管理部门牵头,由长客厂和北京的京装公司各生产3节车辆组成一列车,由株洲所和中国铁科院分别供应牵引和制动系统,在北京地铁线路上进行考核试运行。

北京地铁管理部门对此给予了大力支持,安排这列试验列车在9号线上跑了1年,先是空跑和装沙跑了5万公里,然后又载客跑了2万公里。一年下来,株洲所的牵引系统、长客厂和北京京装公司的地铁车辆都有了工程业绩。国产化终于迈出了关键的一步!

机遇又一次降临准备好的企业。2007年上海地铁一号线一辆已经运营12年的列车在事故中撞坏,需要维修。上海地铁方找到车辆国外供货方。该公司提出,由于车型久远不再生产,维修费用会等同于购买一列新车。了解到这一重要信息,株洲所派人找到上海地铁业主,表示可以提供免费维修,条件只有一个,就是将车辆的牵引系统全部更换成株洲所的国产牵引系统。换装了国产牵引系统的地铁列车,一年后跑了10万公里,各项性能指标全部达到原来的进口系统标准。原来国产系统并不比进口系统差。为此,上海地铁已经运行12年的其他线路,全部换上了株洲所的牵引系统。

2010年,世博会在上海召开。上海地铁运营管理部门在世博会地铁线上,安排3列车分别装上外企和株洲所的牵引系统,半年时间跑下来,人们发现,在各项性能指标中,国产系统与进口系统相比不相上下。因此,上海地铁建设管理部门决定,上海新建地铁线路的轨道交通车辆全部安装株洲所的牵引系统。

政策指引,业主支持,国产牵引系统终于走出困境。2008年前全国地铁线路车辆的牵引系统全部来自进口。自从株洲牵引系统进入市场,这种国外公司的垄断局面被打破。目前株洲所生产的牵引系统占领全国牵引市场的七成以上。

### 从自力更生到自主创新:中国牵引技术的王者之路

20世纪60年代以来,我国实行“独立自主、自力更生”的科技发展战略。在此战略指引下,株洲所曾经参与了“韶山”系列铁路机车的技术开发。此后又开始了小功率交流传动技术的实验研究。上世纪80年代中期,株洲所“交流—直流—交流”变频器异步电机研究成功,创造了当时国内交流电传动

系统的最高功率。上世纪70年代,西方发达国家的轨道交通开始对电力牵引技术的研究开发,10年之后的80年代中期,这一技术被广泛推广应用。但迄今为止,这项技术仅为西门子、庞巴迪、阿尔斯通等少数跨国公司掌握,至今不对中国转让。

牵引系统包含传动和网络控制两大关键技术,具有功率大、速度高、节能环保、运营经济等优点,是现代机车车辆的“心脏和大脑”,业内被称为“机车之芯”,是一个国家轨道交通装备水平的重要标志。

为了打破西方少数跨国公司对于铁路关键技术领域的垄断,从上世纪80年代以来,株洲所先后投入30多亿元,历经几代人的努力,创立了一个以牵引电传动技术为核心的技术开发平台和产业链,为我国的轨道交通及其装备制造提供了强大的技术支撑。

首先是主持研究铁道部“电力机车三相交流传动地面试验”重大课题,并与兄弟单位联合研制成功Ac4000交流传动电力机车原型车,此后又相继启动了高性能交流传动控制技术、中大功率IGBT主变流器等系列牵引电传动核心技术研究,先后开发出“熊猫号”“蓝箭号”“中华之星”等多种型号电力机车。

进入新世纪以来,以丁荣军为代表的创新团队积极响应自主创新的时代号召,将原始创新、集成创新和引进消化再创新紧密结合,创造性地发明了以两点式和异步电机为主、兼有三点式和同步电机的全新牵引技术模式。在中国铁路从普载、常速,到重载、高速的时代性跨越中抢占技术制高点。

在新一轮高铁技术攻关中,株洲所独立承担牵引变流器、网络控制系统等三大关键技术,成功解决了高速动车组要求变流器“功率大、体积小、重量轻”的技术难题,再次确立了自己在行业牵引电传动和网络控制技术领域的王者地位。

2010年以来,随着中国高铁建设进入高峰期,株洲所研制生产的牵引传动系统先后中标京沪、武广、郑西、沪杭等高铁线路,成为国内高铁项目最大的牵引系统供应商。

2010年12月4日,世界上最长的京沪高铁试运营,由株洲所提供牵引、南车四方公司生产的动车组跑出了时速486.1公里的世界铁路最高运营速度。

50多年来,中国南车株洲所迈过坚实的步伐一路走来,从成立之初“自力更生”的实践者,到改革开放早期“技术引进的先行者”,到新时期成为“自主创新的引领者”,不断推进我国轨道交通装备的牵引控制技术进入世界强国之列。

到2013年为止,作为中国南车集团排位第三的一级子公司,株洲所已经在海外进行过三次跨国并购,拥有三家上市公司,年产值160多亿元,产品已经遍布世界30多个国家和地区。

### 在大气层打一个漂亮的“水漂”

求非常高,必须精准穿越,才能安全返回地球。

为了尽可能提高返回器的测轨精度,北京飞控中心在任务中首次采用三站联合接力跟踪技术。该中心飞控总主任设计师席露华介绍,参与联合接力跟踪的圣地亚哥、玛斯帕拉马斯和纳米比亚三个测站均位于境外,在地理分布上成三角几何状。就像三角形结构是最稳定的形状一样,采用三角几何状分布的测站联合接力跟踪测量,可以确保实现高精度轨道测量。

该技术给飞控工作带来了许多难题。席露华说,科技人员从建立基础逻辑分析模型入手,做了上百次方案论证和误差分析,最终让一个个难题迎刃而解,为实现安全再入返回奠定了坚实基础。

6时许,北京飞控中心大屏幕上出现了返回器的模拟动态。它越过了南大西洋、印度洋,沿着预定轨道向着祖国飞来。

该中心测控通信指挥员指挥长陈宏敏介绍,为迎接返回器,测控通信系统沿返回走廊布设了一条地面测控链,通过它向返回器发送指令,并获取数据,实时计算返回器的轨道并预报其着陆地点。精确的轨道预报是引导测站跟踪返回器和进行返回器落点预报的前提。

十余分钟后,返回器抵达距地面大约120公里的大气层边缘。

与神舟飞船以大约每秒7.9公里的第一宇宙速度返回不同,此次任务返回器进入大气层的速度超过每秒11公里,已接近第二宇宙速度。以这样的速度返回地球,如果不能有效减速,返回器会在大气层中烧蚀殆尽。

为此,我国首次采用了半弹道式跳跃的返回方式。“跟我们小时候打水漂类似,飞行器要在大气层表面‘打个水漂’。”探月工程三期副总设计师郝希凡说,返回器首次进入大气层后将受控“跳”起,经过滑行再次进入大气层并飞离落区。如果成功,返回器的速度会进一步降低,降到第一宇宙速度时,后面的过程就轻车熟路了。

这一跳并不容易。郝希凡说,高层大气变化无穷,受到黑天白夜、太阳风、地磁场等多种因素影响,大气变化误差很大。

王勇表示,高空大气密度变化范围可达正负80%,低空大气密度变化范围也有20%—40%。“如果大气密度高,就让返回器早点跳;密度低就多降点再跳。”他说,返回器进入大气层后,制导导航与控制系统要实时对气动参数、大气密度等进行辨识、仿真和计算,且要在极短的时间内完成,对该系统带来

了严峻考验。

在持续3分多钟的初次再入后,返回器从距离地面60多公里外一跃而起,跳回约110公里高度,并按计划实现二次再入,完美地跨过了归途中最危险的“一道坎”。

### 给热控加一个开关

即使借助了跳跃方式,返回器再入大气层仍会对热控带来挑战。返回器再入速度大,时间长,表面温度最高可达2000多摄氏度,如果传导到内部,将对其载荷产生严重影响;而在之前的飞行阶段,器上惯性测量单元工作时发热量很大,又必须释放出去。散热和隔热,成为科技人员必须解决的矛盾。

抗烧蚀是第一道必需攻克的关键。五院总体部防热结构设计师们为飞行试验器巧妙设计了“防热服”。他们针对月球轨道返回热环境、空间环境和重量的要求,提出了不同部位耐烧蚀和隔热的具体需求与指标,新研了7种防热材料,完成了防热材料的布局 and 局部防热结构设计,实现了我国由近地轨道再入到深空轨道再入的防热结构设计的跨越。同时提出了三维热烧蚀分析方法,在我国首次采用整体变厚度、变密度、分区域、偏轴设计方案,突破了轻量化设计关键技术,并利用一维烧蚀分析和三维温度场分析相结合的数据分析方法,实现了用全面的局部烧蚀试验代替整体烧蚀试验,为任务成功奠定了基础。

为让返回器在历时8天的旅程中成功抵抗宇宙环境和再入环境的温差,科技人员更是首次攻克了异构式环路热管控技术。五院飞行试验器热控分系统主任设计师宁献文说,该技术就像给热控加了一个开关,需要散热时打开,需要隔热、保温时关闭,有效解决了返回器再入大气前的大热耗散热、热导调节和再入过程中热阻断等技术难题。

### 回收成功率高于99.9%

在距地面约11公里处,它的速度已降到每秒百米左右,进入了此次任务最后的回收着陆阶段。这时,它要用到最后一样减速装备——降落伞。

五院回收分系统主任设计师荣伟说,返回器落地时,速度应降到每秒10米左右,为此开伞时机大有讲究。开得太早,强大的空气阻力会使得降落伞的温度不断升高,直至烧毁;开得太晚,返回器可能来不及降到规定速度就会撞到地面。

此次任务中,五院508所的设计师首次把高度作为开伞的控制参数。回收系统副主任师江虹说,无论返回器的飞行轨迹是否偏差,在到达11公里这一预先设计高度时,回收

### 质检总局:汽车GPS导航不合格率16.2%

科技日报讯(记者林莉君)10月29日,国家质检总局通报了汽车GPS导航产品质量国家监督抽查情况。不合格产品检出率为16.2%,不合格项目全部为辐射骚扰项目。

2014年第三季度,质检总局对汽车GPS导航产品抽查了3个省(市)80家企业生产的

80批次产品,抽查企业数约占全国生产企业总数的五分之四。不合格产品检出率为16.2%,同比上次抽查上升了1.4个百分点。本次抽查重点检测了导航性能、导航功能、安全指标和电磁兼容性。抽查的大中小企业数量分别为8家、15家、57家,大型企业抽查

合格率为100%。重点抽查了集中产区广东省78家企业的78批次产品,抽查比例占总数的97.5%,有13批次产品不合格,不合格产品检出率为16.7%。

据介绍,辐射骚扰主要是指能量以电磁波的形式由源发射到空间,或能量以电磁波的形式在空间传播的现象。辐射骚扰超标的产品可能引起周围装置、设备或系统性能降低,干扰信息处理设备或其他电子产品的正常工作,并对人体造成一定危害。

### 压减燃煤,清洁空气“第一板斧”

(上接第一版)

#### 天津电厂改造,排污费涨了,缴费少了

“我们一机组二氧化硫实时排放量5.4毫克/立方米,氮氧化物为8.3毫克/立方米,烟尘为3.7毫克/立方米……”天津市大港发电厂副厂长张国庆指着中控室的LED屏向记者介绍,脸上洋溢着几分自豪。

今年7月1日国家颁布实施了新锅炉大气污染物排放标准,燃煤机组二氧化硫、氮氧化物和烟尘排放限值分别为50、100和20毫克/立方米,燃气机组上述三项指标排放限值分别为35、50和5毫克/立方米。

大港发电厂目前装有四台328.5兆瓦燃煤机组。“从7月1日到10月10日的100天里,除二机组烟尘排放略超燃气排放标准外,其他的都低于燃气排放标准。”张国庆说,该结果给电厂带来的直接效益是,在天津市排污费标准上涨9倍情况下,电厂需缴纳的排污费不增,反减少了50%以上。

在今年7月1日起,天津市对二氧化硫、氮氧化物、氨氮、化学需氧量4种主要污染物实行新排污费政策,其中二氧化硫、氮氧化物分别由1.26、0.63元/公斤提高到6.3、8.5元/公斤,污染物收费标准由平均0.82元/公斤调整为7.82元/公斤。

大港发电厂环保专工陈吉山说,去年发电厂缴纳排污费1200万左右,如不进行改造,按涨价后标准,仅氮氧化物一项就需缴纳五六千万元;改造到正好达新排放标准,年需交纳排污费仍在3800万元左右。

于是,大港发电厂进行了大规模的脱硫、脱硝和除尘改造,实现了“超低排放”,即接近燃气机组的排放限值。“虽然这轮改造我们共投入了4亿元,但一年就能省下几千万排污费!”张国庆说。

#### 河北淘汰落后产能,“自我加码”,超额完成

河北产业结构偏重,钢铁、建材、石化、电力等“两高”行业比较集中。据河北省政府《化解产

能严重过剩矛盾实施方案》,到2017年,河北压减炼铁、水泥产能均为6000万吨,压减煤炭消耗4000万吨,压减平板玻璃3000万重量箱。

压减煤炭消耗,电厂是“大户”。河北华电石家庄裕华热电有限公司是石家庄市南部区供热支柱,其生产技术部负责人邱向东告诉记者,2009年前,电厂排出的是发黑发黄的烟气。随着近年来大刀阔斧的技术改造,这家电厂已将燃煤“改出了”“燃气”的效果,特别是在今年9月,裕华热电1号机组新一轮技改完工,经河北省环境监测中心站监测结果显示,其排口的烟尘、二氧化硫和氮氧化物浓度分别为4.7和27毫克/立方米,大幅低于被称作“史上最严标准”的《火电厂大气污染物排放标准》规定。

裕华公司是河北节能减排的一个缩影。河北省工业和信息化厅副厅长周军堂说,截至今年10月中旬,河北已分别淘汰炼铁、炼钢、水泥和平板玻璃产能671万吨、2813万吨和2176.5万重量箱,分别完成国家下达任务的203%、46.9%、1407%和86%。河北节能减排工作初见成效,高耗能行业发展明显放缓,全省规模以上工业能耗同比下降5%,单位工业增加值能耗同比下降9.5%。

(上接第一版)

“在接近地球时,虽然也可以通过不断变轨走以前的成熟路线,但代价是多背负几吨重的燃料。这显然不切实际。”他说。

为满足返回路程、速度等多方面要求,五院502所科技人员“画”出一道全新的弧线。其中,制导导航与控制系统发挥了关键作用。

五院飞行试验器返回器GNC副总设计师王勇介绍,通过“导航”可以知道返回器的位置,“制导”能帮它找到回家的路,“控制”则使它走上这条路。

在服务舱、返回器分离的一瞬间,导航系统和高精度惯性测量单元准确测定出返回器的精准位置,在茫茫宇宙中标定了弧线的起点。自此,返回器进入制导阶段。这是个巨大的空间三维隧道,连接首尾的弧线有无数条,通过制导器件精准计算,预测出返回器下一个点的位置,在隧道中一个点一个点连成了最精确的弧线。最后,科技人员通过实时修正控制,确保返回器贴近理想的轨迹。

### 三站接力护送返回器精准穿越

如果把地球比作一个篮球,返回器回家的通道宽度则比一张纸还薄。

五院飞行试验器轨道主管设计师汪中生说,返回器的轨道设计对再入点参数精度要

系统都会发出开伞指令。

由于返回器仅重300多公斤,科技人员为它量身打造了轻量化回收系统。他们通过优化降落伞的结构设计,采用先进材料制造技术,实现了与伞衣密切连接的伞绳在承受力不变的前提下减重20%以上。为确保安全可靠,他们在伞绳、伞衣等环节上都设计了备用方案以实现“双保险”,对降落伞开伞、弹出等关键动作的火工品进行了超过300次的地面试验,还利用空中飞机投放、地面火箭助推等方式模拟不同的工作条件,进行了20余次试验验证。多管齐下,确保回收成功率高于99.9%。

与神舟飞船相比,返回器往返于地月之间,将穿越地球外层空间高辐射带,使其回收系统降落伞受到的空间辐射达到了神舟飞船降落伞的50倍。同时,飞行器再入返回与大气摩擦产生的高热,也会给降落伞带来风险。为此科研人员进行了大量空间辐射对材料性能影响的试验研究工作,采取了耐烧、隔热等多种设计措施,保证回收系统的材料都能经受住极强空间辐射和高温考验。

除打开降落伞,返回器还会启动无线信标,以便搜索。它配有两种信标,分别为国际救援组织通用频率和民用频率。

6时42分,在着陆场光学雷达和红外雷达的注视下,返回器翩然而至,稳稳落地。

(科技日报北京11月1日电)