

多普勒独立测速定位法和中国轨道 说说“651”的故事

刘易成 中国科学院高能物理研究所

1970年4月24日我国第一颗人造卫星“东方红一号”升空上天，2016年3月8日中央决定把每年4月24日定为我国的“航天日”，习近平主席和李克强总理都发表了指示并致以祝贺。

2009年9月8日，中科院原副院长张劲夫在《人民日报》刊文《第一颗人造卫星是如何上天的》写道“1999年，我写了《请历史记住他们——关于中国科学院与“两弹一星”的回忆》文章，说明原子弹是二机部为主负责，导弹是五院（指原中国人民解放军第五研究院）为主负责，科学院配合他们工作。我国第一颗人造卫星是中国科学院为主负责，从建议我国搞人造卫星，到“东方红一号”卫星方案的提出，卫星本体的设计、研制、试验到初样的成功，以及空间环境的探索和地面遥控系统的建立等等，都是中国科学院为主完成的。……中国科学院在我国

第一颗人造卫星方面做了奠基性、开创性的工作。”张劲夫同志在该文结尾处写道：“发射卫星最重要的是地面跟踪测轨问题。赵九章所长说过，试想一颗几米尺度的卫星送上轨道后，就像几公里之外的一只苍蝇，如果不能紧紧抓住，如何去找它？因此，发射卫星，首先要把卫星运行规律、轨道计算、测量、预报以及跟踪站的布设等搞得一清二楚。科学院理当把此任务承担起来，先走一步。他请数学所关肇直副所长立即组织人员落实此事。1966年1-3月，在651设计院组织有关专家对短弧段跟踪定轨进行大量模拟计算和分析研究的基础上，肯定多站多普勒独立测轨的方案，使我国中低轨道卫星的跟踪测轨系统形成了中国自己的特色。3月22-30日，在北纬饭店召开地面观测系统方案论证会，审定了各分系统的方案。不久，在4月召开的两次轨道选择会议

上,根据实际需要和可能,与会者一致做出了将轨道倾角从40度左右增大到70度左右的结论,不仅根本改善了卫星轨道的总体性能,而且可节省地面站建设的大量投资。”

1956年在周总理主持下制定了《十二年科学技术发展规划》。规划提出的“自力更生,迎头赶上”和“以任务为经,以学科为纬,以任务带学科”的方针,完全符合我国“一穷二白”的国情,“两弹一星”的成功正是在这一方针指导下取得的。1958年毛泽东主席和党中央提出我们也要发展人造卫星后,院党组就把卫星研制列为中国科学院1958年的第一项重大任务,为了保密代号叫581任务。地球所成立了“581”任务组,为发展卫星做前期准备,其他各所也有相应的举措。

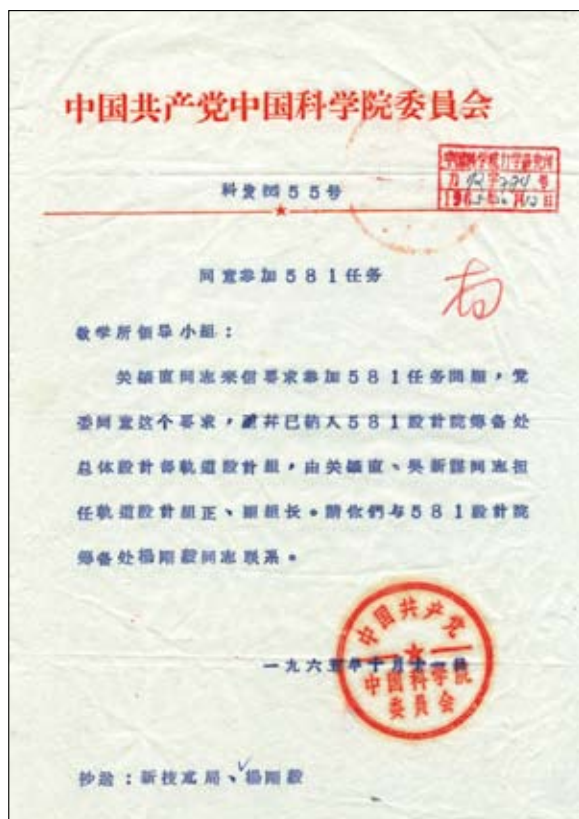
数学所副所长关肇直是1947年加入中国共产党,并经党组织批准赴法留学的老党员。1949年回国,参与科学院组建工作,为中国科学院首届党组成员之一。他积极执行“学科带任务,任务带学科”的方针,团结和引导数学工作者参加到经济和国防建设的实际工作中贡献自己的力量。他自己也以身作则,承担了国防任务,例如原子弹研究中需要解决的中子迁移等理论问题。为了配合卫星轨道需求预做准备,他于1960年代初在数学所主持成立了力学室。同时,根据国防建设,特别是基于当时发展火箭、导弹等国防尖端武器,以及学科发展本身的需要,在钱学森的倡议下,他于1962年在数学所组建了我国专门从事控制理论研究的机构——控制理论研究室,并亲任室主任,宋健任副主任。他是我国现代控制理论的开拓者。

根据科学院《军工史》—《中国科学院国防科学技术》记载,1964年10月,赵九章等应邀到

靶场参观东风2号导弹的发射,并座谈运载工具发展前景及探讨作为卫星运载工具的可能。12月下旬,在全国第三届人大会议期间,赵九章致信周恩来总理,认为中国已具备研制人造卫星的条件,提出导弹打靶应与发射人造卫星相结合,可一举两得,建议争取在建国20周年时发射。周恩来指示中国科学院提出具体方案。1965年1月8日,钱学森也向国家提出报告,建议早日制订人造卫星的研究计划并列入国家任务。据此,国防科委邀请张劲夫、钱学森、孙俊人及国家科委、国防工办专业局的负责同志和专家进行了座谈。1965年4月29日,国防科委根据座谈意见,向中央专委提出在1970—1971年发射我国第一颗卫星的报告。报告建议:卫星工程总体及卫星本体由中国科学院负责,运载火箭由七机部负责,地面观测、跟踪、遥控系统以四机部为主,科学院配合。中央专委于1965年5月4日召开的第12次会议对上述报告进行了讨论,并指示中国科学院提出规划方案。5月31日,根据专委精神,中国科学院正式成立四个工作组。卫星本体组,组长解肇元、杨嘉墀、方俊;地面设备组,由王大珩、陈芳允负责;生物组,由贝时璋负责;轨道组,由关肇直负责。各组积极开展工作,于7月1日向中央呈报了《关于发展我国人造卫星工作的规划方案的建议》。

8月9日、10日,中央专委召开第13次会议讨论并原则上批准此方案,张劲夫也成为专委成员,负责卫星的研制,把人造卫星搞成。为了全国协作方便和保密起见,以周恩来总理对赵九章建议批示时间(1965年1月)定名该任务为651任务。

8月中旬,中国科学院召集院内有关单位负责人开会,传达中央专委决定,讨论卫星工程任务



落实和组织落实。会议决定成立三个组：领导小组，由谷羽任组长，杨刚毅、赵九章为副组长。总体设计组由赵九章任组长，郭永怀、王大珩为副组长。办公室由新技术局计划处处长陆绥观任主任，办理日常工作。会议责成总体设计组立即草拟第一颗卫星的总体设计方案。为了全面开展卫星的研制工作，中国科学院于1966年1月组建卫星设计院，代号为651设计院，公开名称为中国科学院科学仪器设计院，负责卫星总体设计和卫星本体研制工作。赵九章任院长，杨刚毅任党委书记，钱骥等任副院长。1966年3月4日，国防科委张震寰副主任召开会议，决定地面观测系统的规划、设计、建设和管理工作改由科学院负责。为此，中国科学院于同年5月成立701工程处，由杨

家德、陈芳允负责。至此，第一颗人造卫星的研制任务就全面展开。

1965年国庆前夕，关肇直找我谈话，说要调我主持轨道组的业务工作，征求我的意见。从1959年底我在前苏联联合原子核研究所工作期间，看到王淦昌、周光召等被召回国承担国防科研任务，使我感受到国家的需要；1961年我回国休假时看到公交车上顶着个大包，不知是什么东西，经询问得知是因为没有汽油而以煤气代替开公交车。在苏联时周光召就告诉我说过苏联已经断绝了跟我们的石油贸易，但实际看到此情此景，刺激极大，眼泪不禁夺眶而出，深感国家不强受人欺，而现在我们的国家在党的领导下是压不夸的了。这些促使我产生了改行为国效力的想法，并多次致信关肇直希望回国从事实用的工作项目。但事到面前就要求我必须放弃来之不易的自己喜爱的理论物理研究；不过为国效力已是我的成熟想法，所以很快就确定下来。

卫星任务是个巨大的系统工程，包括本体、运载火箭和地面测控三大工程系统，分别由科学院、原七机部和四机部分工负责。这在当时都是世界尖端技术，只有苏美拥有。美国对我禁运，中苏关系破裂，这类尖端技术和设备，你花多少钱也是买不来的。搞卫星一切都得靠自己。当时我们是个穷国，技术力量也很薄弱，搞卫星困难很多。但我国的科技人员在党的领导下，其爱国热情爆发出巨大的能量，攻关克难，短短几个月就使卫星本体工程取得决定性的进展，形势喜人。

一、卫星总体方案论证会和多站多普勒独立测轨法

总体方案论证会和中国轨道^[1, 2]

1965年10月20日，中国科学院受国防科委委

托，主持召开了中国第一颗人造地球卫星的总体方案论证会，会期长达40余天。到会的有来自科学院和各有关部委、军队的120多位专家学者。会期过半，大部分项目都按总体要求落实了，但地面测轨设备则达不到要求，成为总体方案的一个待解难题。轨道选择的42度倾角也不能满足侦察等实用卫星的需求，需日后另建发射场解决。

关肇直确定了调动我的工作后不久就下放农村参加“四清”去了，对我的具体工作仅仅交代说，院里会有人跟我联系。不久，院里负责跟关肇直联系的潘厚任就来找我。他是“581”总体组成员，给我介绍了许多重要情况，对我帮助很大，使我得以开始进入角色。在陈芳允召开的一次小型会议上，他介绍了地面测轨系统的初步设想，说初轨测量需采无线电为主，光学为辅的方针，并具体介绍了正在考虑使用的各种测轨设备等重要情况。此后北京天文台的王绶琯台长也到数学所来，给我介绍无线电干涉仪交叉测量的定位原理；潘厚任则介绍我认识了应地所的周炜，了解到他们在电离层测量中使用多普勒的情况和电磁波通过电离层时会发生频移，以及使用双频可以使其得到修正等专门知识，但就是找不到现成的测轨算法。他们的出现帮助我了解到许多情况、学习到不少东西；同时也使我清晰地感觉到，能不能找到有效的多普勒独立测轨法，可能会成为解决测轨问题的关键所在。

我国第一颗卫星是利用已有的酒泉基地发射，卫星从赤峰入轨到丹东飞出国境仅500公里，即使加上观测可以外延的部分，可测弧段也不超过2000千米。总体要求首颗人造卫星上天后必须“抓得住”，困难很大。解决卫星发射时的实时测轨问题，我国远比苏美困难。苏联国土大，而且是第一家，无需跟他人比对；美国则在国外设有许多观测站，条件更是优越。我国发射卫星则

必须在狭小本土上的短弧段内实时测定初轨。如果卫星升空，抓不住，测不准，不能及时公告卫星何时到达何地上空，而被苏美抢先报道，那将有损我国形象。为了万无一失，地面系统拟采用由原四机部承担研制的154-II型精密有源雷达和科学院西南电子所配合研制的应答器为主，由科学院负责的无线电比相干涉仪和多普勒测速仪，以及大口径光学跟踪经纬仪、测卫望远镜等多套设备为辅的测轨方案，技术指标定得也比较高。

《会议》落实任务时，光学经纬仪可于1968年运抵现场参加联调，但需要苛刻的日照条件，不能作为发射卫星时实时测轨的主要设备；雷达的研制周期长，不能保证赶上总体进度；干涉仪在技术上还存在一些问题，没有把握。科学院应地所的孙传礼介绍了他们在多普勒测速仪方面可以达到的各项指标，但就是没有现成的独立测轨算法而成为悬案。测轨问题竟成了会议的攻关中心之一。

中国轨道和多站多普勒独立测轨法

论证会中期，我在大会上做了一次发言。我说，问题的关键是要找到多普勒独立测轨法。如果做不到这一点，那么万一雷达赶不上总体进度，还可以用2台干涉仪和3台多普勒，同步交汇测定卫星的实时位置和速度，并算出初轨来。但是，干涉仪由分布在长基线上的多个抛物面天线组成，工程大，投入高，即使在赤峰和丹东一带设点观测，要保证精度，其长基线信号传输线需要恒温，困难也不小。

方案论证会前夕，我就试图找到多普勒独立测轨的计算方法，面对这一困局，更加激起了我的责任心和创造激情。一方面，就我的直观来说，多普勒观测数据包含了6个轨道根数足够多的信息，肯定存在一个测轨方程来反映它们；另一

方面，千思万想，却怎么也得不到那一点“灵感”，打不开思路。问题的关键出在测轨的传统思路都是以几何测量量：赤经赤纬，距离、仰角、方位角 等等为基础的，这方面从拉普拉斯时代就已导出完整的公式体系，成为人们的固定思考模式。虽然多普勒原理大家都知道，但在测量学方面尚未展开充分的研究。一个卫星观测站只能测到卫星对该站的一个径向速度分量，如何从这里找出卫星的位置来，确实有些困难。

我在提出干涉仪-多普勒相结合测轨时，已经有了三站测定卫星速度矢量的想法，它使我走向了运用“多站”和“运动学”量创建测轨方程的方向。困扰数日后，突然在脑际出现了6个多普勒观测站同步观测，但由于卫星的位置未知而会出现两个速度场的图景。再想一想，这两个速度场“在，且仅在”卫星的实际位置上才会是相等的……，心想“噢，这样不就可以确定卫星的位置了吗！”，心里豁然开朗。用专业一点的话说，就是把卫星的位置作为未知参数，两套独立的多普勒三站测量会给出因卫星位置参数取值的不同而形成的两个速度场，它们相等的那个点，就是卫星的实际位置。一块石头落地，清晨起来，赶快把公式清理出来，没有想到事情竟是如此的漂亮！它是由卫星的速度和位置矢量的6个分量为未知量的一组非线性代数超越方程，且因为任何物体的运动状态皆由其速度和位置确定，因此它也成了为“运动物体的多普勒测量学”奠基的基础方程^[3]，开了历史的先河。

写出这套方程的表达式后，我们还可以下列方式来解释它：每次观测都会给出一个测量方程(3)式，其中左边是物体位置和速度的6个未知分量的已知显函数，(3)式右边是由测量所得的多普勒频移。所以6个独立的多普勒观测站的一次同步观测，可以给出6个独立的测量方程，从而就可以解出卫星的位置和速度的6个分量来。其独立性则由6个观测站的不同位置给以保证。

也就是说，若在适当的不同位置上取6个观测站，在地心赤道坐标系中，卫星和观测站的坐标分别为：

$$\begin{cases} \vec{r}(t) = (x(t), y(t), z(t)) \\ \vec{R}(t) = (X_i(t), Y_i(t), Z_i(t)) \end{cases} \quad (1)$$

它们都是时间 t 的函数；于是从第 i 个观测站到卫星的距离为

$$h_i = \sqrt{[x(t) - X_i(t)]^2 + [y(t) - Y_i(t)]^2 + [z(t) - Z_i(t)]^2} \quad (2)$$

根据多普勒原理，在时刻 t 的一次“同步”观测，可以得到一个测量方程组：

$$\dot{h}_i = \frac{(x - X_i)(\dot{x} - \dot{X}_i) + (y - Y_i)(\dot{y} - \dot{Y}_i) + (z - Z_i)(\dot{z} - \dot{Z}_i)}{\sqrt{(x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2 + (z - Z_i)^2}} = \lambda_0 [f_0 - f_i(t_i)] \quad (3)$$

这里的 $i=1, \dots, 6$ ，其中 $\lambda_0 f_0 = C$ ， C 为光速； λ_0, f_0 分别为星载信标的频率和波长； $f_i(t_i)$ 则为第 i 个观测站在时刻 t_i 所测得的信标频率。

这里的“同步”，意思是(3)式中凡是有关卫星的变量 $(x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$ 都是时刻 t 的函数，凡是与观测站有关的变量 $(X_i, Y_i, Z_i, \dot{X}_i, \dot{Y}_i, \dot{Z}_i)$ 和(3)式右边的 f_i 都是时刻 $t_i = t + \Delta t_i$ 的函数，其中 Δt_i 是信标信号从卫星到该地面观测站所需的传播时间；也就是说，这里的“同步”指的是所有6个观测站接收到的都

是卫星在同一时刻 t 发出的信标信号, 而各站接收到的信号的時刻却是在不同的時刻 t_i 。

由(3)式积分可得

$$h_i(t_{i1}) - h_i(t_{i2}) = \int_{t_{i2}}^{t_{i1}} \lambda_0 [f_0 - f_i(t_i)] dt_i \quad (4)$$

这是多普勒测速定位方程的积分/差分形式, 在三维情况下, 如果取 $i=1,2,3$, 那么它给出的是3个双曲面, 可用于定位。GPS原来用的就是来自长波双曲导航的这种算法; 后来利用精确时标引进雷达测距原理, 变成3个球, 同样可以定位。GPS的测速方程则是后来另外引进的。至今未见如我们那样完整的理论推导出现。可惜的是, 由于保密, 我们这一开创性的工作未能适时发表论文而未被人知, 被埋没至今。

“东方红一号”的周期约为100多分钟, 反推测轨, 初始测量应该达到3位有效数字才比较稳妥。可是, 我们当时的时统精度只有两位有效数字, 所以要求6站同步有问题。

天体力学已经有现成的公式, 可以把卫星的速度和位置分量表达为6个轨道根数的显函数, 而作为未知量的轨道根数是常数, 已与时间无关。所以我们又用最小二乘法对方程组进行了统计处理, 使得真正用于测定初轨的是最小二乘法的法方程, 虽然其形式失去了直观性, 不过这是标准的做法, 不存在额外的疑问。所以, “轨道”这个约束条件, 使得为了测轨就不再需要苛刻的“同步”了, 只是方程的形式变得更加复杂罢了。

事情到这一步, 我就在轨道组会上做了介绍。

在这次论证会上, 地面设备和轨道是分组进行的。设备组讨论异常热烈, 大家都在反复分析和论述各种设备的优点和存在的问题, 都想让自己的设备能为卫星工作做出贡献。通过每天的简报可以互相了解情况。这种胶着状态持续了许久, 大家都期望, 如果多普勒能够独立测定初轨

就好了。

王大珩来参加过几次轨道组的会议, 听取讨论。其中一次, 他介绍了光学经纬仪的情况, 并对测角光码盘技术做了介绍, 至今我仍记忆犹新。光码盘的精度也将决定雷达测角的精度, 这给了我一个提示, 就是154-II型雷达也就是这个精度了。

我介绍多普勒测轨法时, 王大珩并不在场, 但是晚饭后他就来找我并问我“多普勒是测速的, 你怎么能使它定位?”他听了我用两个速度场的方式给他做的比较形象的解释后, 他一言不发, 陷入了沉思, 我则静候着。不料他竟一声不吭地瞪着两个眼睛走了。我觉得他肯定明白了我的思路, 正在仔细琢磨呢。没有想到的是, 第二天晚饭后, 他竟再次专门跑来找我, 为的仅仅是告诉我“你这个想法能行!”我很感谢他, 这时我正需要如他这样的长者的支持呢。

在我报告后第二天上午的轨道组会议上, 我的报告虽然也得到人们的赞许, 但是并没有预期的和应该有的那么热烈。到了下午开会时, 一位老先生说“你这个办法, 谁也没用过, 怎么能知道它行不行呢?”我说“多普勒设备简单轻便, 投资少, 应地所又有技术储备, 研制周期短, 比较有把握。所以要赶快确定多普勒测速仪的研制, 然后实测美苏卫星予以检验”。他说“现在没有实测数据, 怎么就能决定多普勒上马呢”。为了打消某些人的疑虑, 我说“我们可以立即开始计算机模拟, 摸清情况”。

模拟计算获得成功和地面系统方案的制定

这次会议本应由关肇直牵头出席, 但他四清

去了，由吴新谋代替，所以他立即跟计算所联系进行模拟计算的事宜。会后立即由卫星总体组、数学所、紫金山天文台和计算所组成联合小组，对多普勒、雷达、干涉仪和光学测轨进行模拟计算和分析比较。紫金山天文台负责天文望远镜的模拟；数学所轨道组则分成雷达、光学经纬仪、无线电干涉仪和多普勒4个组，在计算所派来的两位同志的帮助下编程和上机计算。可惜时隔久远，已经没人能想起他们两位的名字了。其他设备的定轨都是已知函数的直接计算，只有多普勒方法需要解方程。在对多普勒算了3000多条模拟轨道后，表明其求解收敛快且稳定，性能与雷达相当，可以确定在第一圈的短弧段内能够独立测定卫星初轨，精度可确保向世界公告我国卫星的准确轨道参数和飞经各地的时间和方位。

模拟计算的成功令陈芳允十分高兴，他立即拉着潘厚任去国防科委做了专门汇报。几十年后，大约是在2010年吧，突然接到一个电话，说他叫龙新华，他说“当年我是方案论证会简报组成员，我知道你的多普勒测轨法解决了大问题，所以记住了你的名字。张劲夫曾在领导小组会上点名表扬过你，说我们就需要这样有创新思维的年轻科学家。所以我一直想着不知道你现在混的如何了，后来看到《中国青年报》对你的专访^[5]，深感不安，辗转找你找了好几年，终于从邻居处打听到你这个电话。”他还特意把张劲夫文章《第一颗人造卫星是如何上天的》的结尾部分转发给我。

1966年2月，陈芳允主持召开了地面系统会议，编写了《卫星地面观测系统方案及分工建议》的报告，提出中国第一颗人造卫星的无线电跟踪系统采用以多普勒测速仪为基础、卫星入轨点测量以154-II雷达为主和干涉仪只做试验的系列化方案。这时关肇直已经四清完毕回所，所

就以与我一同出席了这次会议，他说“看来你与各方都很熟悉了嘛”。回想起来，他这话似乎表明他终于松了一口气，算是放下了调我到底能不能胜任而一直悬着的那颗心了。此后，有关651的一切事项我都及时向他汇报，他对我则是完全放手，而不多加干预。3月4日，国防科委张震寰副主任召开会议，决定地面观测系统的规划、设计、建设和管理工作改由科学院负责[1,p.144]。至此，科学院除了负责技术抓总和本体研制之外，也成了地面系统的实际负责者。为此，中国科学院于同年5月成立701工程处，由杨家德、陈芳允负责。至此，第一颗人造卫星的研制任务在科学院就全面展开。

用简单廉价的多普勒测定刚入轨卫星的初轨，在国际上也是打破常规，未见先例的，它体现了我们自力更生和勇于创新的精神。“使我国中低轨道卫星的跟踪测轨系统形成中国自己的特色”^[1, P.146]。

多普勒接收机和星载频标硬件指标的确定

与模拟计算同时，应地所的孙传礼和宫维枢、马芳烈等也在积极进行多普勒接收机和星载频标的设计。大约是1966年4、5月份吧，他们要求与轨道组召开联席会议，确认他们的单频多普勒测速误差不大于1.5米/秒的指标。结果互相确认了在该指标下可以保证“抓得住，测得准”的要求，各自承担起各自应负的责任。顺便说一下，经过统计处理，多普勒测轨方程还能实时测定星载频标因发射振动等导致的随机频漂，这在当时也是顾虑之一。

二、轨道选择

卫星的轨道选择，取决于运载火箭的推力以及跟踪测轨方法和布站所形成的综合捕捉能力。在第一颗卫星方案论证会上，经反复考虑，确定



卫星由酒泉基地向赤峰方向发射，送入42度倾角的轨道。但这种低倾角轨道只能飞行于南北纬42度之间，不能满足以后将陆续发射的卫星系列的要求，特别是由于美国、苏联的战略军事力量，大多部署在42度以上的地区，采用这种低倾角轨道的侦察卫星，将无法完成任务。在讨论中曾设想在东北新建一个基地和相应的入轨点台站网，以满足侦察卫星的要求。

为什么不能把轨道倾角选得更大点呢？一是万一第一圈测轨失败，42度轨道的卫星一连四圈都要飞经我国，其中第二、三圈卫星将从西藏、新疆入境，横贯我国全境，还可补救；二是大倾角朝偏北方向发射，稍有偏差，运载火箭残骸就会落在蒙古国或苏联境内，造成难堪局面。因

此，首星发射要求安全稳妥，而侦察等实用卫星需要大倾角轨道，所以《方案》计划以后另建发射场解决。

能否用酒泉基地增大轨道倾角，兼顾侦察等卫星的需要呢？论证会后钱骥、潘厚任和我都在悉心考虑这个问题。多普勒模拟成功后，我就萌发了从酒泉改向海南岛方向发射的想法，那样就可以得到近70度的轨道倾角。因此我立即组织进行了从测轨、发射通道的地面安全、回收、通信、遥测遥感等方面的模拟分析，并与42度轨道作比较。结果表明：1.卫星入轨后在我国境内可测弧段可延长至3000多公里，有利于第一圈的测轨；2.发射经过的多为大山地带，可以适当选择火箭残骸的落点；3.可以免建另一发射场，节约

巨额经费；4.可为提早发射侦察卫星争取好几年的时间。但是万一卫星第一圈测轨失败，第二圈卫星仅从新疆喀什附近一掠而过，能否补救就很成问题了，风险也很大。好处与风险共存，作为多普勒测轨法的创建人，再提这一建议，一旦失利，岂不前功尽弃了吗？虽说是个人顾虑，但也是事出有因吧，所以一时举棋难定。于是我就找了潘厚任，与之坦诚、推心置腹地谈了我的想法和顾虑。潘说，对轨道选择，钱骥也很关心。钱学森业已告知运载火箭尚有余力，希望大家考虑如何利用。潘说，看来该召开个轨道会议了。他向钱骥做了汇报，并于4月份召开了轨道选择会议。参加会议的有通讯、气象等有关单位的代表。会上我对“改选70度左右轨道倾角”的可行性做了分析；潘厚任介绍了他已计算分析过的不同倾角的卫星可获得的日照条件，证明70度倾角的卫星可以满足照相卫星的需求。改变轨道选择的可行性得到与会者的一致赞同，从军队来的高义同志对此也深表满意。

会后，卫星设计院党委书记杨刚毅感慨地说：“我们搞总体，看来轨道才是总体呢，因为卫星的任务是轨道承担和实现的嘛。”他对钱骥说，你把他（指我）调到总体组来吧。杨刚毅叫我为科学院党组起草给中央专委的《我国卫星的轨道选择》的报告^[4]。我自觉无此能力而再三推辞无效，只好答应把口头论证写成文字材料。但两次稿子，杨刚毅一看就说不行，说你这是在写论文嘛。我就问他，你说该怎么个写法？他顺手拿了张皱巴巴的纸，写了一二百字的开头……。我明白了，他要的不是论证，而是一个院党组给中央专委的决策报告。我原来只想做一个建议者和论证者，我没有能力做决策者。但是这次会议已经把我“改选轨道”的想法，变成了大家的共

识和共同的决定，也为领导决策提供了依据。好吧，我答应按照我的发言起草，但有意把潘厚任对日照条件的分析留给杨刚毅和钱骥修改时加入。因此在上报的文件中未能包括潘厚任对日照条件的分析而至今仍深感遗憾。

没有想到，进度很快，没过几天，就突然接到杨刚毅的通知，要我当天下午到院部向党组书记秦力生汇报。我问还有谁去，他说“就你一人”。我拿到的已经是铅印的正式文本了，看了一下没有任何修改。汇报后没过多久，大约是在5月中旬召开的卫星系列规划会上，又要我就此再作介绍，得到专家们的一致赞同。这段经历也成为我的一次重要的历练，而在重选轨道的工作中，杨刚毅和钱骥同志起了重要的领导作用，我印象深刻，不能忘怀。这也说明当时推行的领导和专家相结合方针的重要作用。

后来杨刚毅告诉我，国防科委对改选轨道的建议非常赞赏，说“你们这次轨道选择的好处，才是实在的呢！”。1967年4月10日国防科委发文，决定“卫星轨道与地球赤道的倾角：70度左右”，“发射中心：酒泉”，“发射方位：南略偏东”。

1967年10月中央专委批准选用70度轨道，使我国第一颗卫星的发射取得了举世瞩目的辉煌成功；不久又用同一轨道发射和回收了返回式，即侦察卫星。

轨道测量和轨道选择是《东方红1号卫星》和《尖兵返回型卫星与东方红一号》两个项目的子项目，这两个项目曾分别获1978年全国科技大会奖和1985年国家科技进步特等奖。关于后者需要做点说明：科学院主张《东方红一号卫星》和当时被称为《尖兵返回型卫星》，分设两个奖项，但不知哪个单位坚持要把二者合一为《尖兵

返回型卫星和东方红一号》，而且一定要把《尖兵返回型卫星》放在《东方红一号卫星》前边。结果该项目一共给了7个获奖名额，科学院只分到两名。在科学院内部讨论这两个名额分配的建议时，赵九章当然是首功，可第二位该推举谁呢？我依次提了钱骥、王大珩和陈芳允3人，但均因他们已调离科学院而不在此限额内，所以我就提名关肇直，我说轨道测量和轨道选择的解决，是个影响全局的贡献，他是学部委员和轨道组的组长，应该是够资格的。没有人提出异议，也得到院里的同意，上报了国防科工委。结果是把两个特等奖分发给赵九章和关肇直。实际上，关肇直的这个奖项是在他1982年过世后的1985年颁发的。

西安计算所和渭南基地

701工程处成立后，科学院把天津计算站的人马调给了西安计算所，目的是为卫星测控中心，即后来的渭南基地做准备。因此数学所派出陆维明前去给他们讲授测轨原理。恰遇聂元梓的大字报，北京的文革已在轰轰烈烈地展开之际。陆维明向周围同志讲述了北京的情况，引起该所党委书记的警惕而致函数学所。我报告了关肇直，随即叫他赶紧讲完课就回来，不保护他，他可能会受到伤害，政治运动嘛。

三、测地和全球测速定位系统与卫星系列规划会

多普勒测轨方程可以反过来用于测地和测速定位。在多普勒测轨方程中，卫星和观测站的位置和速度变量是对称出现的，所以，它既可以测轨，也可反过来测地对地面附近的运动物体进行测速定位，这就为“全球测速定位”系统提供了一套基础的计算方程。

当时美国的导航卫星已取得很大进展，他们

使用的定位算法是从长波双曲导航原理演变过来的，属于积分/差分多普勒一类，而我导出的多普勒测速定位方程则可分为微分、积分/差分多种形式；在测轨中我们采用的是“微分”多普勒，也就是它的频移用的是短时间间隔内的平均值。

多普勒测速定位的模拟计算成功

测轨的模拟计算成功后，为进一步对“测速定位”，和把各种测轨数据进行“分别组合和统一综合”处理，以确定各种测轨设备在测轨中的权重进行考量，我通过吴新谋跟计算所计算室主任张克明联系，请他们协助进行模拟计算和确定实际使用的计算方法。这个工作必须是计算专家才能胜任，张主任委派了张绮霞。由于“651”是绝密项目，所以不能告诉她计算的是什么问题，这给我的介绍和她的接受都造成了困难，也使我和潘厚任的心中都感到对她深深的歉疚。张绮霞不负重任，很快完成了计算，得到了预期的结果。但任何一条卫星轨道，对一个观测站来说都是旋转对称的，所以多普勒测轨至少需要两个观测站；测速定位也至少需要两个在轨卫星才行。我在交给张绮霞的试算方案中，忘了排除一个卫星不行的情况，害她费了不少精力反推不收敛的原因。我去看她时，她已完成所有工作，并且抱歉地告诉我，一套数据怎么也不收敛。我突然想起，说“你是对的。这是我的疏忽，一套数据无确定解，忘了排除这种情况了，实在对不起。”她则既无怨言，也无怨色。多好的同志呀！

测速定位系统和系列规划会议

早在我和潘厚任认识的初期，他就给我介绍了美国使用地面多点同步观测卫星发出的强闪光，进行测地的情况。建立我们自己的地球坐标系，势在必行。为了确定目标物的坐标，还需在地面上确定足够多的参考基点。为此，我翻阅和

学习了《大地测量学》一类的书籍。在卫星系列规划会上，高义同志点名跟我开玩笑说：老刘，你是有主见的嘛，说说有什么办法可以解决这个问题？我说，已请计算所的同志完成了用多普勒测定随地球运动的地面观测站的位置的模拟计算，证明是可行的，问题是我们不能到国外去设观测站呀。我有个初步想法是在地面上寻找适合的电台等频率源，用在轨卫星接收它的信号给它定位，为目标图像确定坐标提供地面参考基点网。我说利用多普勒卫星网也可以建立全球测速定位系统，不过这是个巨大项目，需要原子钟级的精确时标和在卫星信标上携带它发出信号的精确时间信息，需在卫星系列规划中做出具体的安排。此一议题由于文化大革命而未能付诸实施。

在这个依地测天-依天测地的天地互动式测轨构想中，为了提高测轨精度，克服因我国受限不能实行全球布网的缺陷，我提出一个概念性设想，就是建立天地互动式的测量系统，以逐步积累和互相比对的方式，改进因为地球质量的非球对称结构而造成的对卫星轨道影响的测量；同时因为多普勒接收机轻巧，具有只接收不发射的特点，而产生出了可以建议国家考虑在国外适当设立观测站的想法，并向钱骥作了汇报，受到钱骥的极大关注。

轨道会议和系列规划会议后，一方面我对我国卫星工程的全貌有了相当的了解。二则测轨、测地、建立地面测地基点网、全球测速定位系统、侦察卫星的图像识别、天地互动的测轨设想及其所得数据的分析处理、卫星变轨的优化设计等问题都已装进了脑袋加以思考，为以后打开了很大的工作面，需要在轨道组就此有序地建立讨论班，并使轨道组成员学习和掌握计算数学和编程技术。三是已与科学院卫星设计院建立了紧密

联系，包括部分领导也互相认识和彼此了解，所以除了轨道问题外，也需要和可能在更大范围内为自己和数学所的参与做出思考和打算。我的这种状态并不奇怪，许多卫星工程的参与者都是这么主动工作的。

四、科学院成立大总体组及编制实用程序和实测美苏卫星

“为了加强人造卫星的技术管理和协调工作，协助院做好技术抓总工作，通盘考虑人造卫星本体、地面设备等分系统，”科学院于1966年12月6日发出通知，决定成立大总体组。该组成员都是在卫星方案论证会前后开展工作的主要骨干，钱骥、潘厚任和我都是其成员。有关侦察卫



星、测地问题，以及成立405任务组等工作，都是在大总体思想的指引下展开的。不过因文化大革命的动乱，它已难以大力开展工作了。

工作环境虽困难，但是按计划的发射日期已经日益逼近，我们必须及时完成供发射时使用的实用程序。1967年4月由科学院701工程处牵头成立了405任务组，集中在南京紫金山天文台编制发射卫星时供渭南基地使用的数据预处理和测定初轨的实用程序。同时也为实现用我们自己研制的多普勒接收机实测美苏卫星做准备。

文革伊始，聂元梓的大字报得到毛泽东的批示，北京大学的各级党政干部，一夜之间统统成了“黑帮”。我爱人当时在北大数力系任教，同时兼任该系的党总支副书记，当然也就成了“黑帮”，要在来京串联的人流中扫街给人看，受尽屈辱。

之后不久，我的亲戚中许多人都被打成叛徒、特务、走资派，坐牢蹲牛棚；后来在“清理阶级队伍”期间，有人想给我罗织罪名，试图给我戴上苏修特务和反革命小集团的帽子。在当时的历史背景下，我已经无法再担任卫星任务这样的绝密工作了。

1966年中央发表651通知的时候，我并未意识到即将来临的暴风骤雨。6月30日戚本禹在人民大会堂召集的科学院造反派大会上鼓动群众，不久我在数学所前院就看到揪斗张劲夫副院长的场面，数学所内也贴满了大字报等等。我见过许多群众运动，也知道在这种情况下会出现许多不理性的行为，但是这次却有一种从未见过的感觉，觉得很不对劲，心里甚感不安。所以在文化大革命中，我始终没有参加任何群众组织，成为彻底的“逍遥派”。

到了1966年国庆期间，我还拉着陆维明一起

到南京紫金山天文台商量如何协作编制实际发射卫星时供渭南基地使用的数据预处理和测轨程序。回来时，记不得林彪在国庆节发表了一个什么样的讲话，也许是讲了“带枪的刘邓路线”吧，所里已经一片萧瑟。不知造反派在忙什么，但走廊里到处都飘飞着大字报碎片，但没有人，空空如也。心想，651的工作恐怕也要遇到冲击了。

1967年初，上海发起一月风暴，到处都在夺权，对“651”的工作造成巨大冲击。杨刚毅早已被斗，接着钱骥也被揪斗，轨道组当然也被夺权。我勉强维持到1967年4月405任务组成立，并派出陆维明等5人到南京参加该组工作后，不得不被挤出了“651”。在文革混乱的环境下，派去的5人，只有陆维明一人耐着南京的酷暑把工作坚持到底，其他人都先期回家了。陆维明除参加了程序编制外，在数据预处理等陌生领域展开摸索，例如我们用的是“微分”多普勒，其数据采集速率约为每秒10组，而数据预处理要求算得快，不能影响后继计算。定轨计算，仅多普勒他就设计了10余种模拟方案，一一试验，均获成功。程序编制完成时，南京武斗升级，为了确保安全，根据周总理的安排，405任务组的全部成果系由专机运回北京。

此后对美苏的在轨卫星进行了实测试验，结果与他们的公报相符，以实践考验了多普勒独立测轨法的正确性和有效性，更加巩固了它在我国卫星测轨中的地位。在发射卫星时，我们依靠在本土上的测量胜利完成了测定初轨和轨道改进计算的任务。

这段故事表明，我们用软件完成了单凭硬件难以完成的任务，同时也反映了科学院多学科和内部大力协同的优势。

这些工作历时一年多。从测轨方法、模拟计



在2014年4月24日纪念我国首颗卫星“东方红1号”上天45周年座谈会上发言

算、卫星实测的数据预处理和实用程序的编制，到多普勒测速仪、星载信标等软硬件工作，均由科学院有关单位协同完成，是后来没有并入国防口的许多单位和科技人员的共同创作，其中潘厚任、孙传礼、宫维枢、马芳烈、陆维明、赵先孜、张家祥、张绮霞等同志都做出了重要贡献。

数学所轨道组参加此项工作的有陆维明、贾沛章、崔毅、王朝珠、吴松林、张成仁、王联、王暮秋、李孝贵等。

1970年4月24日，“东方红1号”卫星升空时，我和陆维明正在五七干校劳动改造呢。听到消息，心里当然都很高兴，知道我们的测轨和轨道选择方案已被全面采用，但是我们只能噤若寒蝉，心里充满了喜悦和痛苦。1971年夏回来时，“651”任务已移交国防单位多时，科学院的管理机构均已撤销，这段历史也就被封存了，少有人

知，我们也了结了这段令人难忘的经历。

2002年看到一个由林子执导和李雪健等主演的16集电视连续剧《中国轨道》，描述的是一位叫赵汉章的军人服从命令改行在发射卫星时艰苦努力完成任务的故事。故事是从测量“返回式”卫星轨道说起的，但是如果说到中国轨道的特色的话，怎能忘却中国科学院在我国人造卫星开创奠基时期的贡献。科学院副院长兼党组书记张劲夫在《第一颗人造卫星是如何上天的》一文中写道“我国第一颗人造卫星是中国科学院为主负责，从建议我国搞人造卫星，到……地面遥控系统的建立等等，都是中国科学院为主完成的。”他在该文结尾时特别指出的“肯定多站多普勒独立测轨的方案，使我国中低轨道卫星的跟踪测轨系统形成中国自己的特色。”，“将轨道倾角从42度左右增大到70度左右的结论，不仅根本改善

了卫星轨道的总体性能，而且可节省地面站建设的大量投资。”这也是《中国科学院国防科学技术》一书，即国家给出的评价。建国初期，中国科学院具有学科多和人才多的优势，在“两弹一星”中作出过别人无可替代的贡献。希望科学院也能为这段历史搞点连续剧，让老百姓知道中国科学院的科学家们对“两弹一星”所起的不可磨灭的作用。据说1999年中央给23位对“两弹一星”元勋颁发金奖就是张劲夫“请历史记住他们——关于中国科学院与“两弹一星”的回忆”一文促成的。

在中央决定把我国第一颗人造卫星“东方红1号”升空的日子，4月24日定为我国的“航天日”之际，我能在耄耋之年回忆这段历史以资纪念，甚感欣慰。

参考文献

- [1] 《中国科学院国防科学技术》，内部出版物，科学院图书馆有存书。
- [2] 我国第一颗卫星是如何上天的，张劲夫，《人民日报》，2009年09月08日。
- [3] 《第一颗卫星方案论证会专题资料之二十七》《方案论证会》内部资料，科学院空间中心有存档文件，系油印件，文字说明写的也过于简单；公式是我刻蜡版的手书，其中第(6)式有误，应以本文所示为准。
- [4] 关于我国卫星的轨道选择问题的报告，科学院存档文件。
- [5] 不应被尘封的愿望，蔡明，《中国青年报》，2003年6月4日，第9版。