

# Computer Simulation, a Nice Case

—Now We Can Show

Weiming Lu

Academy of Mathematics and Systems Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing  
Email: wmlu@math.ac.cn

Received: Jan. 25<sup>th</sup>, 2013; revised: Feb. 21<sup>st</sup>, 2013; accepted: Mar. 2<sup>nd</sup>, 2013

Copyright © 2013 Weiming Lu. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Abstract:** This paper shows a case of computer simulation in China's aerospace industry, which combines mathematics, physics, astronomy, electricity and manufacture<sup>[1]</sup>. This is a nice case and gives us some nice experiences for future.

**Keywords:** Simulation

## 计算机模拟，一个案例一段佳话

—现在可以说了

陆维明

中国科学院数学与系统科学研究院，北京  
Email: wmlu@math.ac.cn

收稿日期：2013年1月25日；修回日期：2013年2月21日；录用日期：2013年3月2日

**摘要：**本文介绍我国科技工作者使用计算机模拟技术以及与数学、物理、天文、电子、制造融合在中国航天事业奠基工作中发挥的作用<sup>[1]</sup>。这是我国较早成功使用计算机模拟的一个案例；它留下一段中国科技工作者努力合作攻关的佳话，也展示了“两弹一星”精神。

**关键词：**模拟

1970年4月24日我国第一颗人造地球卫星——东方红一号(绝密项目代号651，已解密<sup>[1]</sup>)升空，揭开了中华民族航天事业的第一页<sup>[2]</sup>。

航天丰碑上记载有关肇直<sup>1</sup>院士领导下由数学、物理、天文、计算等各种人才组成的651轨道组所作贡献<sup>[1]</sup>。

将时间拉回到上世纪60年代：我国第一颗原子弹爆炸后，651大项目做了一次全面的研讨，对大协作的各个接口、环节都做了检查，并做出进一步的部

署。当时，651轨道组遇到了一个测量难题——人造卫星是快速绕地球的飞行体，测量与计算她的运行轨道也要求快速；前苏联与美国都有长距离主动雷达等作为观测工具，由这些设备测得的卫星实时位置计算出卫星的轨道参数来，早已有成法可用而十分容易快捷；而我国自己研制的长距离主动雷达等设备的进度可能滞后总体要求，即如果卫星按计划如期上天，那么只采用传统的测量计算方案难以保证精确快速计算出她的飞行轨道并向世人报告她的存在与可观察的时间、地点、方位。在651大项目组的全面研讨中，这个难题成了可能影响东方红一号上天时间的关键

<sup>1</sup>关肇直，已故，时任651轨道组组长<sup>[3]</sup>，中国科学院学部委员(后改称中国科学院院士)，中国科学院数学研究所研究员。

点。刘易成<sup>2</sup>利用物理学的多普勒频移原理，即由运动物体所载频标发射的无线电波的频率在观察者眼中是变化的，频率变化的多少与运动物体的轨迹和速度有关，创造性地提出并推导出“多站多普勒测定卫星初始轨道的方程”，使我国仅用多普勒信号数据即测定出人造卫星运行轨道，简称多普勒测轨，它也是现在北斗系统<sup>[6,7]</sup>，中国卫星全球定位系统的原理方法。

多普勒测轨的物理与数学原理是：测量得到的多普勒数据反映的是速度场；即由三个测点所得之多普勒频移数据可以给出一个反映卫星运行速度的场的数学表达式，因为这时我们尚不知道卫星的实际位置而只能把它作为参数放在数学表达式中；另外三个不同的测点所得的另外一套多普勒频移数据又可以给出另外一个速度场的数学表达式，只有当速度场中反映卫星位置的参数取卫星的真实位置时这两个速度场的数值才会相等，反过来说就是当我们令这两个速度场的方程相等时就可以得到确定卫星的速度和位置的一组测轨方程了。这样就一反过去由几何测量测定轨道参数的思路转到了只用速度测量就能算出卫星的速度和位置的思路上来。

如上所述，使用 6 个测点得到的测量方程组的形式如下：

$$\frac{(x - X_i)(\dot{x} - \dot{X}_i) + (y - Y_i)(\dot{y} - \dot{Y}_i) + (z - Z_i)(\dot{z} - \dot{Z}_i)}{\sqrt{(x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2 + (z - Z_i)^2}} = \lambda_0(f_0 - f_i) \quad (1)$$

其中  $(x, y, z; \dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$  和  $(X_i, Y_i, Z_i; \dot{X}_i, \dot{Y}_i, \dot{Z}_i)$  分别是卫星和第  $i$  个测点在  $t$  时刻的位置和速度；其中  $f_0$  和  $\lambda_0$  是星载信标的频率和波长，且有  $f_0\lambda_0 = C$ ， $C$  为光速。当  $i=1, 2, \dots, 6$ ，即取 6 个独立的测点时，在这 6 个独立的方程中含有 6 个可以完整描述物体运动状态的未知参数  $(x, y, z; \dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$ ，所以这是多普勒测量学的基础方程；它要求同步测量。

由于卫星的运行受到固定轨道的约束，所以其中的  $(x, y, z; \dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$  都是由 6 个轨道参数  $(a, e, i, \Omega, \omega, \tau)$  和时间  $t$  构成的已知函数(由三角函数的乘积等等构成的超越函数)，所以这时可以把(1)式写为：

$$\dot{\rho}_i(a, e, i, \Omega, \omega, \tau; \mathbf{R}_i, t) = \lambda_0 f_i \text{ 频移} \quad (2)$$

其中  $\dot{\rho}_i = \frac{d\rho}{dt}$  表示  $\rho$  对时间  $t$  的导数。方程组(2)使我们免去了 6 站同步测量的要求，而且只要测点的数量大于等于 2，分别进行的总共 6 次测量就可以得到 6 个互相独立的测量方程，从而算出 6 个轨道参数来。模拟计算也证明了这一点，且收敛性良好。

当卫星的轨道已知时，这个方程组反过来可用于测地，也就是用于导航定位。

为了充分发挥包括多普勒在内的现代测量设备快速采集和记录得到的大量实测数据的优势以提高定轨精度，我们用最小二乘法对实际使用的测轨方程做了统计处理，实际使用的是它的法方程，兹不赘述。

多普勒测轨法成功保证了卫星的如期发射，同时它也提供了改选轨道倾角的可能，从而从酒泉基地就可提前成功发射了我国的侦察卫星，并节省下另建发射场的巨额经费。该项目曾获“全国科技大会奖”，是“返回型和东方红 1 号卫星”特等奖的组成部分，“轨道测量”和“轨道选择”已载入中国科学院国防科学技术史册。

事实上，只由物理与数学证明多普勒测轨法的可行是远远不够的，因为星载信标的频率  $f_0$  总是会有误差的(主要包括固定误差，随机误差)，多普勒测轨方案的进一步论证需要计算机模拟，而 651 采用多普勒测轨解决方案的最终确认需要对前苏美卫星的实测(实测是 651 重要的子项目，代号 405，405 的工作做了一年多，它也是一种模拟；同时它把测量、通讯、数据处理、初轨计算、轨道改进等联系在一起，进行了整合，模拟了东方红一号发射时的场景)。

图 1 是很容易读懂的测轨模拟粗方框图。

在图 1 中第 V 框人工判读满意是我们想要的。看得出来，在判读不满意时，第 I 框与第 II 框有文章可做。第 I 框的变动涉及 651 地面观察系统，通讯数据传送，计算中心的布局，测轨模拟粗框图变化可想而知。

强有力的总体协调很快使 651 的地面系统大致定型。我们考虑得更远：设想海上有观察船就可以大幅度提高测算精度，为 651 的后续航天工程提出了建造远望系列测量船的建议，并被采纳，实施，使用至今。

第 II 框的变动涉及 651 卫星本体中频率发生器的

<sup>2</sup>刘易成时为 651 总体组九人小组成员之一<sup>[4]</sup>，兼任 651 轨道组副组长，中国科学院数学研究所理论物理研究室助理研究员<sup>[5]</sup>。

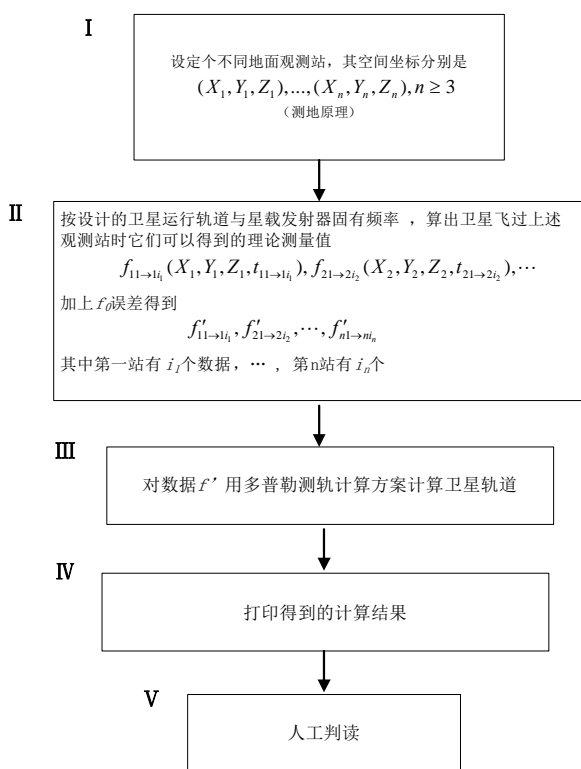


Figure 1. Simulation of orbit calculation  
图 1. 测轨模拟<sup>3</sup>

性能、地面观测站中测频仪器的性能(测量仪器也有各种误差)与数据传输系统的性能(数据经观测站传输到计算中心一样有误差)的变化。

测轨模拟粗框图见图 2。

有 651 方方面面的合作与激励，我们在进行计算机模拟过程中不断得到好消息，设备制造性能在提高，比如，东方红一号本体的频率发生器  $f_0$  越来越趋于稳定，观测站仪器与数据传送性能也越益完美。模拟得到的人工判读数据让我们可以向 651 总体组领导保证，轨道计算没有问题。

用我们的方案实测前苏、美卫星是对 651 地面系统的一次考核，也是最终确认 651 是否已万事俱备。

651-405 实测的粗框图我们省去不写。

前期的工作艰苦卓绝，得到的回报丰硕喜人：651-405 实测工作交出了一份满意的答卷，一切好于预测。

太空中终于迎来了中国的东方红一号，她在世界各国第一颗人造地球卫星的各项技术数据对比中名

<sup>3</sup> 我们的模拟计算包括了所有设备：测卫雷达、干涉仪、光学经纬仪、测卫望远镜和多普勒测轨法，并进行了测轨精度比对。

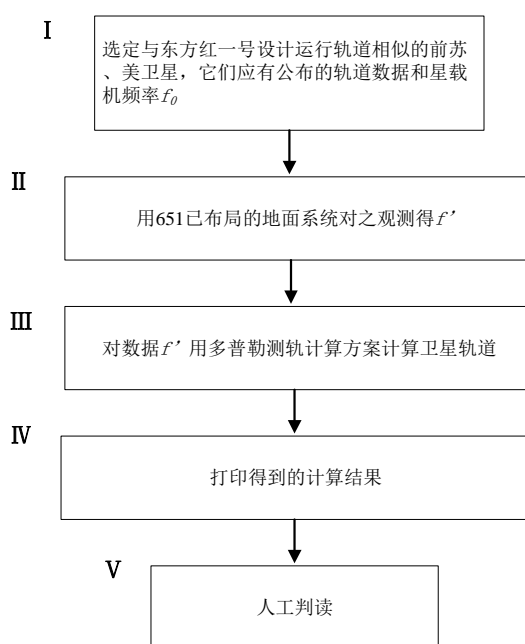


Figure 2. The work of 651-405 group  
图 2. 651-405 实例

列前茅<sup>[8]</sup>。

我们参与了多普勒测轨解决方案的全程：原始创新，大协作，大攻关给我们留下了半个世纪的记忆。

她提示人们：学科交叉，科技融合在 651，当前，将来都会产生不可估量的效果<sup>3</sup>。

致谢：作者万分感谢刘易成同志对多普勒测轨法的陈述作了详尽的修改。

## 参考文献 (References)

- [1] 罗荣兴. 请历史记住他们——中国科学家与“两弹一星”[M]. 广州：暨南大学出版社, 1999.
- [2] 张劲夫. 我国第一颗人造卫星是怎样上天的？[N]. 人民日报, 2006-10-17(14).
- [3] 关肇直任命，中国科学院党委文件，科发(65)55 号[Z], 1965-10-10.
- [4] 刘易成任命，中国科学院文件，(66)院新研字第 0856 号[Z], 1966-12-6.
- [5] 牛寨中，刘少白. 山西省兴县档案史志馆[M]. 山西古籍出版社, 2003.
- [6] 北斗导航系统网站. 北斗[N]. 法制晚报, 2011-12-27(A17).
- [7] 胡占莉. 16 颗北斗亚太“织网”完成[N]. 法制晚报, 2012-10-26 (A27).
- [8] 关于各国的第一颗人造地球卫星[J]. 中国国家地理(CNG), 2007, 559(5): 57.