

大型复杂航天器电缆网准时化投产研究

田志新 魏 平 杜 洁 曹 瑞 王虎妹

(北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)



摘要: 针对大型复杂航天装备电缆网多品种、小批量、技术状态更改多的特点, 提出一种基于动态染色无向图模型的准时化投产方法, 将设备插头互联关系映射成无向图模型, 将设备投产状态和参试时间映射成无向图顶点的“染色状态”和“时间属性”。利用无向图动态染色实现电缆网准时化投产并应用于某卫星, 实现了电缆生产零返工并平滑了生产线负荷。

关键词: 电缆网; 准时化生产; 动态染色; 无向图模型

Harness JIT Production Sequencing for Large-scale Complex Spacecraft

Tian Zhixin Wei Ping Du Jie Cao Rui Wang Humei

(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094)

Abstract: Aiming at the production features of multi-varieties, small-batch and frequent-modification for large-scale complex spacecraft harness, a novel harness JIT production sequencing scheme based on graph-model dynamic coloring is proposed. All connections between each pair of devices are mapped to a graph-model, and production configuration and testing plan of each device is mapped to graph vertex coloring status and timing property. Then, an algorithm based on graph-model dynamic coloring is put forward, and implementation effect on some satellite achieves zero harness rework and balanced harness line.

Key words: harness; JIT production sequencing; dynamic coloring; graph-model

1 引言

传统的航天器电缆网投产模式存在严重不足: a. 采用人工方法进行数百台设备、成百上千根电缆的投产计划编排, 投产计划编排费时、费力; b. 直接以整星/整器电缆网为单位投产, 工序批周期长, 对生产线冲击大, 紧急加工响应速度慢, 不能有效支撑多型号并行制造; c. 航天器设备/构型状态发生技术状态更改后, 人工投产方式复核复算工作量大, 生产线产生废料多, 并且经常发生电缆投产与参试设备不一致引起研制进度延误。电缆网准时化(Just In Time, JIT)投产对航天器系统集成具有重要意义。

目前, 学术界一般从通用数学建模角度对多品种、小批量条件下的生产管理问题进行研究, 相关研究文

献主要体现在车间布局设计^[1]、装配线平衡^[2]、作业组织模式^[3]、批量加工模式^[4]和生产周期研究^[5]等方面。但学术界的研究工作均未考虑特定行业/产品的特点。工业界的研究则一般针对行业/产品特点进行生产管理研究: 廖声冲等人^[6]针对某航天传感器产品的生产特点, 给出了该产品制造单元的实施步骤及设计方案; 薛静等人^[7]从任务分配单元的制定、作业人员的安置、配套件的分类管理、生产节拍控制及产品的质量监督方面分析了电缆网成组生产组织模式的实施; 叶启付等人^[8]以缩短设计与制造周期、降低生产与物流成本、提高设备利用率等为优化目标, 构建了多品种小批量壳体生产单元的多个布局仿真模型; 项迎^[9]提出一种可插入制造方式, 为航天伺服企业运用精益生产的拉动式均衡排产提供了可实现手段。然而, 目前工业界的

基金项目: 高分辨率对地观测系统重大专项青年创新基金支持项目(GFZX04060103)。

作者简介: 田志新(1975), 博士, 电路与系统专业; 研究方向: 卫星总体设计、卫星系统集成、电缆网及信息流数字化设计。

收稿日期: 2017-07-13

研究成果针对的均为设计状态已定型的产品，无法应用于设计状态多变产品的生产管理。

分析了复杂航天装备电缆网产品的特点并据此提出投产策略；建立了航天器电缆网投产问题的动态染色无向图模型；给出基于“染色”无向图模型的电缆网自动化投产算法，实现了航天器电缆网准时化投产；通过一个应用案例说明本文方法的详细应用过程；最后给出了结论。

2 大型复杂航天装备电缆网的产品特点及投产对策

大型复杂航天装备的电缆网产品具有以下特点：

a. 多型号交货冲突：由于设备、人员有限，电缆网产品生产过程中经常出现多个型号产品同时使用相同设备或人员，导致产品长时间等待；

b. 技术状态变化大：航天器产品技术状态变化导致电缆网接点重新设计，由此导致电缆网生产经常反复；

c. 测试组合模式多：大型复杂航天器研制包括初样、正样阶段，在每个阶段还包括若干系统联试和大型试验^[10]，不同测试状态下航天器设备投产和参试状态差异极大，由此导致参试电缆的投产状态也存在着极大差异；

d. 工序批周期长：航天企业目前以单个航天器为单位进行一个经济批量安排生产，每批产品全部加工时间长，大型航天器电缆加工可能造成多个同期并行研制航天器的长时间等待；

e. 产品相似性大：电缆网产品虽然分属不同型号，但产品的专业种类、工艺路线基本一致，便于资源共享。

上述产品特点表明，大型复杂航天装备电缆网面临多品种、小批量、产品质量/可靠性要求高、“边研制、边定型、边生产”的生产现状。据此提出以下投产策略：

a. 针对电缆网产品相似性大、工序批周期长、多型号交货冲突的问题，通过单型号分批投产、多型号混合并行生产的方法，实现多型号资源共享，避免按型号投产工序批周期长、多型号交货时间冲突导致的进度延误问题，同时均衡生产线任务，提升瓶颈资源使用效率；

b. 针对大型复杂航天装备不同阶段产品组合模式多的特点，充分考虑各个阶段的设备参试状态，针对设备组合状态安排电缆网产品投产，避免投产多余电

缆分支导致的材料损耗；

c. 针对电缆网技术状态变化大的特点，在设备技术状态受控后再进行电缆网投产，考虑到设备生产周期一般远长于电缆网产品生产周期，从而降低了电缆网产品的返工率，并避免了电缆网与设备技术状态不一致导致的测试安全隐患。

3 电缆网投产问题的动态染色无向图建模

航天器多台设备通过电缆连接完成供电、遥控遥测、数据传输等。航天器接口数据单规定了设备插头的信号互联关系^[11]。将航天器接口数据单定义的设备插头信号互联关系映射为无向图模型，其中，设备插头映射为顶点，信号连接关系映射为边；设备投产状态映射为顶点的“染色状态”，设备参试时间映射为顶点的“时间属性”；通过分析设备投产状态和参试时间，定义电缆网的投产状态和投产时间数学模型，基于无向图“染色状态”和“时间属性”在边、顶点和子图上的自动化传递和更新，实现电缆网自动投产。为便于描述，定义术语如表1所示。

表1 电缆网无向图模型术语定义

符号	定义
$G(V,E)$	航天器电缆网对应的无向图模型
$V = \{V_1, V_2, \dots, V_M\}$	无向图 M 个顶点的集合
$E = \{E_1, E_2, \dots, E_N\}$	无向图 N 个边的集合
$GV_t = \{V_i, V_j, \dots, V_k\}$	子图 t 包含的顶点集合，包含顶点 $V_i, V_j, \dots, V_k$
$DLW_t = \{E_r, E_p, \dots, E_q, GV_t\}$	子图 t ，包含顶点 GV_t 和边 $E_r, E_p, \dots, E_q$
$DLW = \{DLW_1, DLW_2, \dots, DLW_T\}$	图 G 包含的 T 个子图的集合
$E_s = \{A \rightarrow B\}$	与顶点 A, B 相连接的边 E_s

不失一般性，记 $DeviceA_X_i$ 与 $DeviceB_X_j$ 相连为 $DeviceA_X_i \rightarrow DeviceB_X_j$ 。基于信号互联关系的无向图模型建模过程如下：

a. 定义无向图 $G(V,E)$ ，其中， $V=\{\Phi\}$ ， $E=\{\Phi\}$ 。

b. 依次读取航天器接口数据单，第 k 个互联关系 $DeviceA_X_i \rightarrow DeviceB_X_j$ ， $k=1, 2, \dots, N$ ，

提取信号所在设备插头的信息 $DeviceA_X_i$ 和 $DeviceB_X_j$ ，如果无向图顶点集合 V 中尚无 $DeviceA_X_i$ 或（和） $DeviceB_X_j$ ，将插头 $DeviceA_X_i$ 或（和）

DeviceB_ X_j 映射到顶点集合 V 中;

提取信号互联信息DeviceA_ $X_i \rightarrow$ DeviceB_ X_j , 如果边集合 E 中尚无该互联信息, 则将该信号互联信息映射到边集合 E 中;

c. 最终将全部设备的电连接器映射为无向图的顶点 $V_i(i=1,2,\cdots,M)$, 信号连接关系映射为无向图的边 $E_j(j=1,2,\cdots,N)$ 。

经过以上步骤, 航天器设备接口数据单中的信号互联关系转化为无向图模型 $G(V,E)$ 。

4 基于动态染色无向图模型的电缆网准时化投产算法

电缆物理上由具有连接关系的若干分支和插头组成, 是设计、生产加工、总装铺设、技术状态更改的最小单位。电缆网投产方案与设备投产矩阵和测试计划紧密相连, 航天器电缆网投产状态和投产时间需要满足如下约束:

a. 分支投产约束: 两台设备均投产, 则该两台设备的互联电缆分支需要投产; 互联信号中只有一端设备投产, 则该互联信号不需要投产电缆;

b. 插头投产约束: 如果与设备插头相连的互联电缆均不需要投产, 则该插头不需要投产; 如果插头上任意一组信号需要与另外一台设备互联, 则该插头需要投产;

c. 分支投产时间约束: 电缆分支在其两端所连接的设备均参加系统联试时才安装;

d. 电缆投产时间约束: 任意一个电缆分支需要参加系统联试时, 则整根电缆需要参加系统联试。

基于以上四项约束定义染色无向图上的“染色”关系:

a. 边染色: 如果边的两个顶点全为“染色状态”, 则该边为“染色状态”; 该边任意一个顶点为非“染色状态”, 则该边为非“染色状态”;

b. 顶点染色: 如果与顶点相连的所有边均为非“染色状态”, 则该顶点为非“染色状态”; 如果顶点相连的所有边任一边为“染色状态”, 则该顶点为“染色状态”;

c. 边时间属性计算: “染色”边的“时间属性”等于该边两个顶点“时间属性”中的较大值;

d. 子图染色状态和时间属性计算: 子图中任一边染色, 则该子图为“染色状态”; 子图“时间属性”等于其包含的所有边的“时间属性”的最小值。

于是, 航天器电缆网投产问题就转化为无向图顶点“染色状态”和“时间属性”在无向图边、顶点和子图的传递和更新问题。算法包括如下步骤:

a. 顶点“染色状态”和“时间属性”赋值: 读取设备投产矩阵, 投产设备的插头对应应在图上的顶点为“染色状态”; 读取测试计划, 参试设备插头对应应在图上的顶点的“时间属性”等于该设备的参试时间;

b. 根据边染色定理和顶点染色定理, 求解边“染色状态”, 更新顶点“染色状态”;

c. 根据边时间属性计算定理、子图染色状态和时间属性计算定理, 计算“染色”边的“时间属性”, 并计算子图的“染色状态”和“时间属性”;

d. 将子图反演为电缆网投产方案, 子图的“染色状态”为该子图对应电缆的投产状态, 子图“时间属性”即为对应电缆的交付时间, 子图内顶点“染色状态”即为对应电连接器插头的投产状态, 子图内边的“染色状态”即为该边对应电缆分支的投产状态。

5 示例验证

本文方法已在某卫星电缆网投产中应用。以一台供电设备(HYA01)、一台存储设备(HYB01)、两台数传设备(HYC01、HYC02)、一台载荷设备(HYD01)组成的“联试试验”为例, 说明本文方案在各类场景下的应用。

5.1 电缆网的无向图模型建模

表2 设备接口数据单定义的信号连接关系

序号	信号源端	信号终端	信号内容
1	HYA01-X01	HYA01-X01	平台供电电源
2	HYA01-X02	HYB01-X01	存储器供电电源
3	HYB01-X02	HYC02-X02	试验信号
4	HYB01-X03	HYC01-X01	数据输出信号 1
5	HYB01-X04		数据输出信号 2
6	HYB01-X03	HYC02-X01	数据输出信号 3
7	HYB01-X04		数据输出信号 4
8	HYB01-X05	HYD01-X05	数据输入信号

首先, 根据卫星全研制流程电缆编号统一的要求, 将表2中全部设备电连接器互联关系映射为无向图模型(如图1所示)。其中, 五台设备HYA01、HYB01、HYC01、HYC02、HYD01包含的11个设备插头映射成无向图的11个顶点, 即 $V= \{V_1,V_2,\cdots,V_{11}\} = \{HYA01-X01, HYA01-X02, HYB01-X01, HYB01-X02,$

HYB01-X03, HYB01-X04, HYB01-X05, HYC01-X01, HYC02-X01, HYC02-X02, HYD01-X05}; 8个信号连接关系形成8条边, 即 $E = \{E_1, E_2, \dots, E_8\} = \{HYD01-X05 \rightarrow HYB01-X05, HYA01-X02 \rightarrow HYB01-X01, HYB01-X03 \rightarrow HYC01-X01, HYB01-X04 \rightarrow HYC02-X01, HYC01-X01 \rightarrow HYB01-X04, HYB01-X03 \rightarrow HYC02-X01, HYB01-X02 \rightarrow HYC02-X02, HYA01-X01 \rightarrow HYA01-X01\}$ 。对全部子图编号, DLW_1

和 DLW_2 均包含两个顶点和一条边, 为单分支电缆, 电缆和电缆分支编号均为W001、W002; DLW_4 包含4个顶点和4条边, 为多分支电缆, 电缆编号为W003, 分支编号分别为W003_1、W003_2、W003_3和W003_4; DLW_5 包含两个顶点和一条边, 为单分支电缆, 电缆和电缆分支编号均为W004; DLW_5 包含一个顶点和一条边, 为星表插头, 编号为X01B。

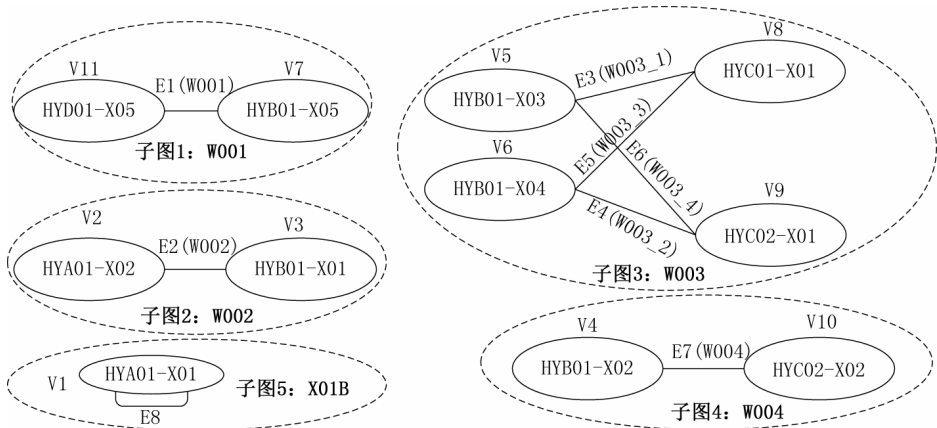


图1 电缆网无向图建模示意图

5.2 基于动态染色无向图模型的电缆网准时化投产

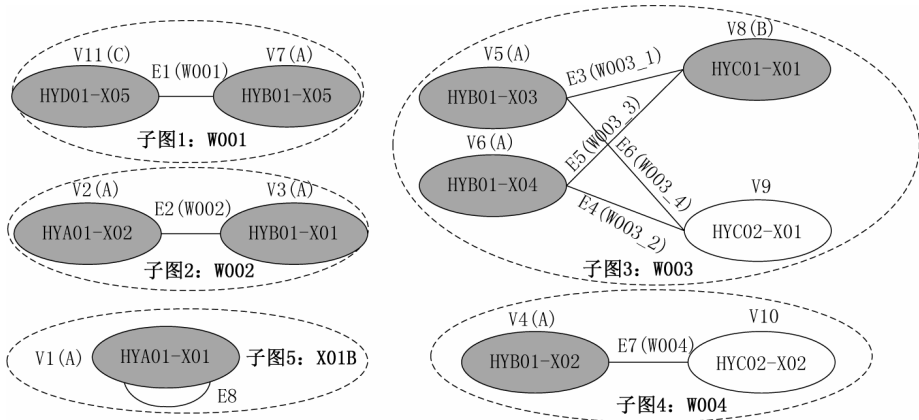


图2 设备投产状态/参试时间的无向图属性映射过程示意图

表3 初样阶段设备投产计划

序号	星上设备	投产状态	备注
1	HYA01	是	平台设备, 成熟度高, 技术状态稳定
2	HYB01	是	平台设备, 成熟度高, 技术状态稳定
3	HYC01	是	载荷设备, 成熟度中, 技术状态变化较多
4	HYC02	否	载荷设备, 成熟度中, 技术状态变化较多
5	HYD01	是	载荷设备, 成熟度低, 技术状态变化多

表4 初样阶段测试计划

序号	参试设备	参试时间
1	HYA01, HYB01	A 阶段 (2009-1~2009-3)
2	HYC01	B 阶段 (2009-4~2009-7)
3	HYD01	C 阶段 (2009-8~2009-9)

如图2所示, 将表3“卫星投产矩阵”映射为无向图顶点“染色状态”(顶点“染色”/“未染色”

状态采用阴影/非阴影表示，边“染色”/“未染色”状态采用粗实线/细实线表示），数传通道设备 HYC02 不投产，与之相关的两个顶点 V9（HYC02-X01），V10（HYC02-X02）为“未染色”状态，其他顶点为“染色状态”；根据表4“测试计划”，将设备参试时间（A状态、B状态、C状态三个时间点简记为A、B、C）映射为无向图顶点的“时间属性”。

如图 3 所示，根据无向图顶点的“染色状态”，通过逻辑“与”运算求解无向图上边的“染色状态”，与顶点 V9（HYC02-X01）相连的边 E4，E6 为“未染色”状态，与顶点 V10（HYC02-X02）相连的边 E7 为“未染色”；根据无向图边的“染色状态”更新顶点“染色状态”，顶点 V4 连接的边只有 E7 且该边“未染色”，因此更新为“未染色”状态。

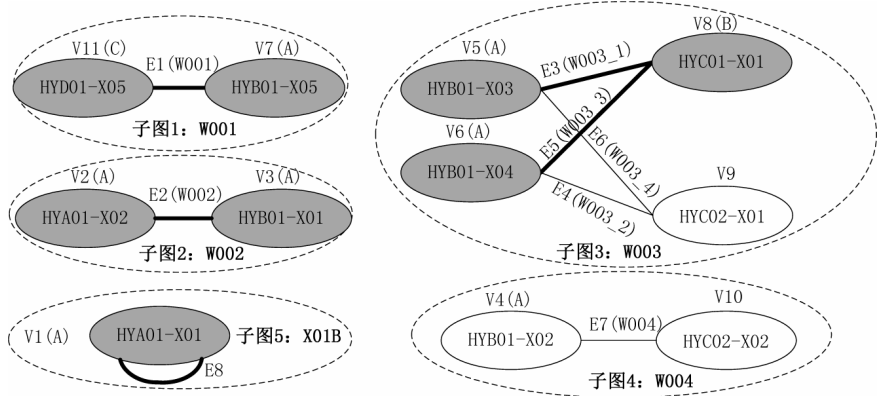


图 3 无向图边和顶点“染色状态”计算

如图 4 所示，每个“染色状态”的边的“时间属性”等于与其相连的两个顶点的“时间属性”较大值；子图“染色状态”为其包含的全部边“或”运算，“时

间属性”等于其包含的所有“染色”边的最小“时间属性”。

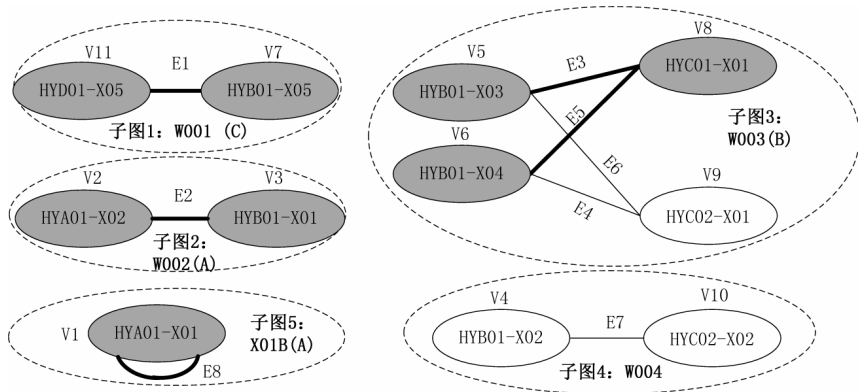


图 4 无向图子图“染色状态”和“时间属性”求解

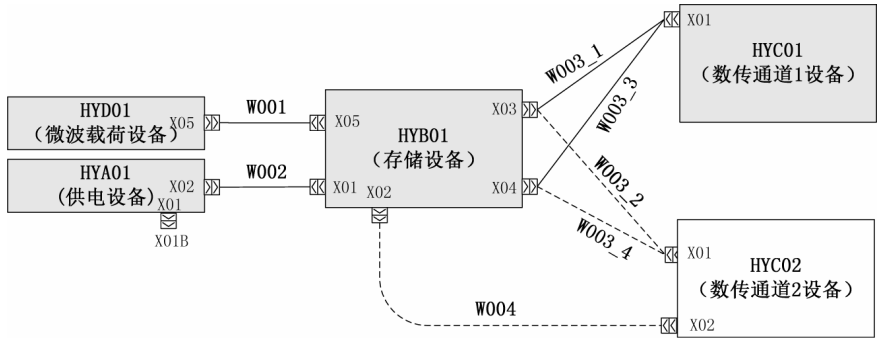


图 5 染色无向图反演为电缆网投产

将无向图反演为电缆网投产方案,即子图的“染色状态”为相应电缆的投产状态,子图内边的“染色状态”为相应电缆分支的投产状态,子图的“时间属性”为电缆的交付时间,见图5和表5。

表5 电缆网准时化投产方案

序号	投产状态及交付时间		电缆分批投产设计
1	投产	A 阶段	星表插头: X01B 电缆分支: W002 电缆插头: HYA01-X02, HYB01-X01
2		B 阶段	电缆分支: W003_1, W003_3 电缆插头: HYB01-X03, HYB01-X04, HYC01-X01
3		C 阶段	电缆分支: W001 电缆插头: HYD01-X05, HYB01-X05
4	不投产的电缆分支/插头		电缆分支: W004, W003_2, W003_4 电缆插头: HYB01-X02, HYC02-X01, HYC02-X02

6 结束语

本文提出基于动态染色无向图模型的电缆网准时化投产方案,实现了从整星投产模式到分批平滑投产模式转型,提升了航天器电缆网生产线的运营效率。该方法已成功应用于我国某卫星,按测试阶段分批投产,平滑了电缆网生产线负荷;测试计划充分考虑单机技术成熟度,确保单机技术状态明确后才投产,实现了电缆网生产零返工。该设计方法不仅适用于航天器,还可应用于运载火箭、武器系统、飞机等大型复杂装备的电缆网准时化投产。

参考文献

- 1 夏春燕, 樊树海, 王宇乾. 混流生产车间布局重构设计研究[J]. 机械设计与制造, 2012(6): 263~265
- 2 Gamberini R, Gebennini E, Grassi A, et al. A multiple single-pass heuristic algorithm solving the stochastic assembly line rebalancing problem[J]. International Journal of Production Research, 2009, 47(8): 2141~2164

- 3 孔继利, 贾国柱. 一类多品种小批量混流制造系统作业组织模式与工件排序[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(4): 981~991
- 4 张毕西, 关迎莹, 宋静. 考虑学习率的人工作业系统批量加工模式优化[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(4): 622~627
- 5 Johnson D J. A framework for reducing manufacturing throughput time[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2003, 22(4): 283~298
- 6 廖声冲, 何伟. 某传感器的多品种小批量单元生产模式研究[J]. 航天制造技术, 2014, 8(4): 5~10
- 7 薛静, 陈静, 李瑛, 等. 航天电缆生产组织模式研究[J]. 航天制造技术, 2015(6): 11~14
- 8 叶启付, 李国丛, 单振刚, 等. 多品种小批量壳体生产单元布局仿真优化[J]. 航天制造技术, 2015(6): 11~15
- 9 项迎. 适合多品种小批量均衡排产的可插入式制造方式[J]. 航空制造技术, 2012(19): 76~78
- 10 郭宝柱. 空间项目的研制程序——循序渐进的研制过程[J]. 航天器工程, 2014, 23(2): 1~6
- 11 马显军. Q/W 1127—2007 航天器设备接口数据单编写要求[S]. 北京: 中国空间技术研究院, 2007