概念设计集成系统与星座方案探索

郭爱斌 米 洁 董晓琴 邓家禔

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

摘 要: 进一步研究了快速方案选择和概念设计新方法. 结合概念设计过程,给出星座方案选择和卫星概念设计的基本模型,在方案探索和概念设计中集成了风险和不确定性分析;应用系统综合设计优化平台(SDOF)开发卫星星座概念设计集成系统,实现卫星星座方案探索优选;集成系统交互、演进、分布式协同设计,可自动运行优化过程,同时可监视和控制设计任务单元运行状况,优化完成后用户可定制设计报告内容和格式;最后介绍了对地观测卫星星座概念设计实例,采用多岛遗传算法进行优化,初步验证了该系统在技术原理上的可行性.

关 键 词: 卫星设计; 方案选择; 概念设计; 不确定性; SDOF

中图分类号: V 457; TP 391. 72

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2007)05-0613-05

Concept design integrated system and constellation architecture exploration

Guo Aibin Mi Jie Dong Xiaoqin Deng Jiati

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The method of rapid architecture selection and concept design was further discussed. The elementary models of satellite constellation's architecture selection and concept design combined with concept design process were introduced. Risk and uncertainty analysis were integrated into the models. The integrated system of satellite constellation concept design was realized by using system design optimization framework (SDOF). The design process of the integrated system was given. The satellite constellation architecture selection and concept design proceeded with the interactive, evolving and collaborative fashion. The concept design optimization could be executed automatically, and the operation of design task unit could be monitored and controlled. After the completion of satellite concept design optimization, the design report's context and style could be tailored by the costumers. The example for the satellite constellation for observing the earth was presented and its optimal result was achieved by using the multi-island genetic algorithm. The result demonstrates the usefulness and validity of the system.

Key words: satellite design; architecture selection; concept design; uncertainty; SDOF

单颗卫星不能满足全球观测任务需求,而星座具有良好的覆盖能力,并可以提高系统的鲁棒性和生存能力;星座中卫星部分失效时,系统仍能实现全部或主要的任务目标[1]. 卫星系统快速采办需求日益增加,采办时间也要求越来越短[2],这就要求快速理解需求,并能对系统性能进行初步评估. 这些需求对概念设计提出了新挑战. 概念设计是把概念转化为产品过程中的第一步,是产品开发过程中最为重要的阶段,也是计算机辅助设计最薄弱环节[3-4]. 概念设计对设计人员约束最少,具有较大的创新空间,重大创新与技术突破都在这个阶段实现. 概念设计完成时,问题的基本求解方法和主要设计决策已经确定,概念设计决定了项目最终成本与进度的 80%[5]. 文献[2]提出快速方案选择和概念设计新方法,该方法通过定义任务目标等需求,快速探索方案空间,可给出多种可选方案;根据费效分析,对可选方案及其可行性进行详细评估后,选择较优方案进行概念设

收稿日期: 2006-07-10

作者简介: 郭爱斌(1977-),男,山西榆次人,博士生, abguo@buaa.edu.cn.

计;无论是基于已有方案的改进,还是进行新系统设计,都可以提高系统方案选择及设计的准确性和效率,对进一步进行概念优选和设计有十分重要的意义.本文将简要介绍在北航工程系统设计优化研究中心(ESDORC)进行的快速方案选择与概念设计的新方法研究以及实现的技术环境.

1 概念设计过程

概念设计主要包括选择主要设计参数和方案验证,所涉及的关键技术包括过程建模、特征表示、方案生成、方案评价和系统开发5方面,而系统开发是实现计算机辅助概念设计的关键步骤.

本文结合文献[2]提出的方案选择和概念设计过程给出卫星星座概念设计过程,如图1所示.该过程由星座方案选择和卫星概念设计2部分组成,在方案选择部分确定系统架构,如卫星数目、轨道参数、任务周期、有效载荷类型、通信方式等,并探索所用方案组成的权衡空间.在概念设计部分,详细确定方案的技术可行性,改进成本评估,进一步理解所选的设计方案.该方法可在设计过程早期定量评估众多设计方案.探索可行方案组成的权衡空间,通过分析而不是采用定性或基于经验的方法进行评价,以免设计者和用户过早把重点放在单一的符合规定要求的设计方案上.该方法对于新系统设计、缺少评价或没有经验的新方案和新技术开发都十分有意义.

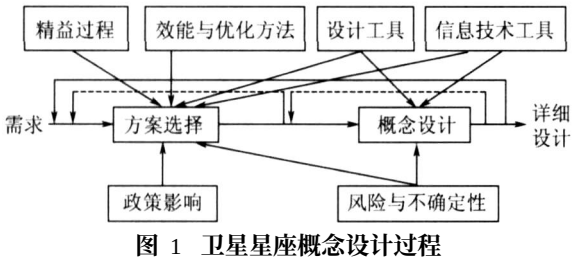


图1 卫星星座概念设计过程

本文结合图1所示的概念设计过程给出卫星概念设计系统平台结构,主要包括卫星概念设计环境、输入输出接口以及所用工具的开发与集成等,如图2所示.

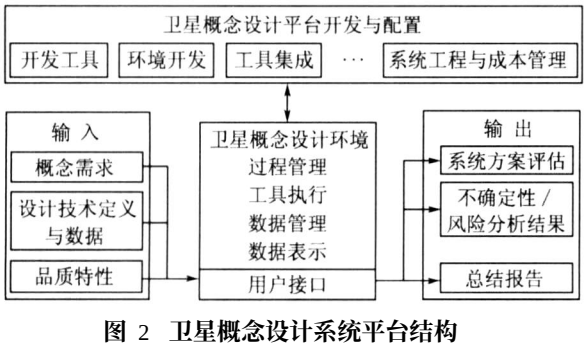


图2 卫星概念设计系统平台结构

2 概念设计模型

结合卫星星座概念设计过程给出星座方案选择和卫星概念设计基本模型,这2部分采用不同精度的设计模型,并可反复迭代执行.

2.1 星座方案选择模型

在方案选择模型中,表示不同方案的设计变量有:4日内回归圈数,轨道数,轨道倾角,各轨道面上卫星数和升交点赤径.由设计变量生成方案空间,对各个方案进行任务分析、卫星平台设计和运载火箭选择,最后计算各方案的性能和成本,并在各方案中集成了风险和不确定性分析.

在设计早期把不确定性条件简单认为确定性条件,可能会产生错误结果[6],在实际分析中也不可能考虑全部不确定性因素.本文只考虑性能分析模型的不确定性和成本分析的不确定性.任务分析采用点数值仿真方法,该方法的不确定性按15%考虑;成本分析的不确定性主要考虑了技术发展的不确定性和成本估算方法的不确定性.

本文将方案选择作为一个独立的仿真模块,用VB对其封装,实现星座方案选择功能,采用模拟退火算法对所有方案进行探索,之后由设计者根据经验和所列方案的成本和不确定性选择适当的方案进行概念设计.

2.2 卫星概念设计模型

卫星概念设计由12个模块组成,主要包括:任务分析、有效载荷设计、运载火箭选择、卫星平台设计、卫星几何模型仿真、成本与不确定性分析和设计优化模块,其中卫星平台设计包括结构子系统、命令与数据处理(C&DH)子系统、推进子系统、姿态控制子系统、通信子系统、电源和热子系统[7-9].概念设计的设计结构矩阵如图3所示,图中黑点表示模块之间数据的耦合关系.

任务分析采用商用软件STK(Satellite Tool Kit 5.0)来实现.运载火箭选择模块基于SQL server2000开发的火箭数据库应用程序,分为初选和校验2步,如图3所示.首先根据有效载荷质量,估算出卫星的发射质量,初选运载火箭,确定运载火箭的运载参数,进行卫星结构设计;当卫星平台的各个子系统设计完后,根据卫星实际计算质量和CAD模型(SolidWorks模型)所得的最大几何外形尺寸和质量特性,校验所选择的运载火箭是否满足设计要求,若满足则进行成本和不确定性计算.

对任务分析和CAD模型所用的分析软件分别用VC和VB作了二次开发,并封装为适合系统

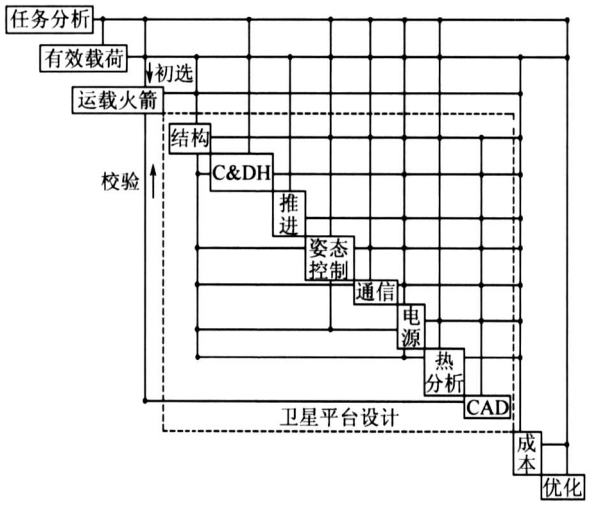


图 3　卫星概念设计设计结构矩阵

综合设计优化平台(SDOF, System Design Optimization Framework)自动运行的工具包.

2.3　方案选择和概念设计费效分析

在方案选择中,由于可用信息有限,卫星成本按公用舱成本、有效载荷成本和发射成本计入.星座由多颗相同的卫星组成,计算总成本采用学习曲线修正[7].在概念设计阶段星座总的费用 $C(X)$ 由空间成本、发射成本和付给承包人的费用组成[7].空间成本由生产成本、RDT&E成本和软件成本组成,发射成本等于发射次数乘每次发射的费用,付给承包人的费用按空间成本的 10%计入.

效能模型为 $P(X) = a \cdot C + b \cdot S + c \cdot T$.其中,$C$为最小覆盖百分比;$S$为有效载荷信噪比;$T$为最大响应时间;$a, b, c$为权重系数.在方案选择中采用点数值仿真方法来近似表示覆盖特性,这时取 $b = c = 0, a = 1$.在概念设计阶段 a, b, c均不等于 0.

3　集成系统

3.1　SDOF概述

由 ESDORC开发的 SDOF,提供了不同学科工具协同完成分析和分布式工作机制,支持多专业、多学科设计人员在同一集成框架下进行设计探索;提供一个优化设计框架,为设计人员提供多种可选的优化方法,具有良好的可扩展性,便于添加新的优化算法;支持以曲线、图表为手段的数据分析,提供了重现分析过程和结果的能力;采用用户名和口令登录方式保证了数据安全性.

SDOF最上层采用工作流服务器进行过程和工作流控制与管理,并对设计任务单元(DTU, Design Task Unit)运行进行监测.PDM软件 SmarTeam在底层提供数据管理和版本控制功能.通过在建立设计结构矩阵(DSM, Design Structure Matrix)时定义公共变量和 DTU文件解析及传输机制实现各个模块的数据交互.SDOF优化器中封装了 ESDORC开发的 MIST优化工具包和 iSIGHT中的所有优化算法,用户可根据实际问题类型选择优化算法.

3.2　系统集成过程

1) 建立 DSM,如图 4所示,主要包括:定义任务书、系统全局参数及各模块之间的耦合参数,各模块的执行条件与顺序,最后保存并发布 DSM文件.

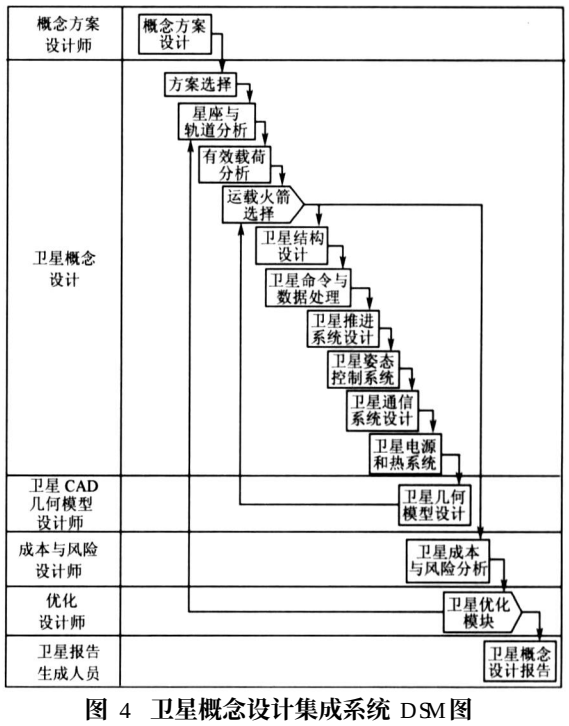


图 4　卫星概念设计集成系统 DSM图

2) 在图 5所示过程管理器的"包管理"属性页中载入步骤 1)中发布的 DSM文件,在"用户管理"属性页中给项目各个参与者分配任务.

3) 在图 5所示过程管理器的"过程初始化管理"属性页中初始化设计过程,在"过程监视器"

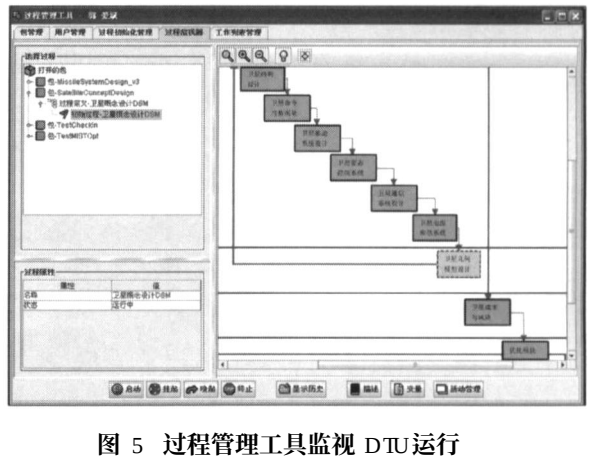


图 5　过程管理工具监视 DTU运行

属性页中可启动、终止、监视 DTU的运行情况;在“工作列表管理器”属性页中可查看 DTU执行情况.

4) 设计人员可以采用用户名和口令登录 DTU工作台,在工作列表管理界面中接受任务,并打开工作台界面,如图 6所示. 接着配置 DTU,包括配置仿真程序 (在卫星概念设计模型中开发的可执行组件)、接口文件和附加文件、解析设计变量和接口参数等,并试运行仿真模块,如果运行正确,即可发布 DTU.

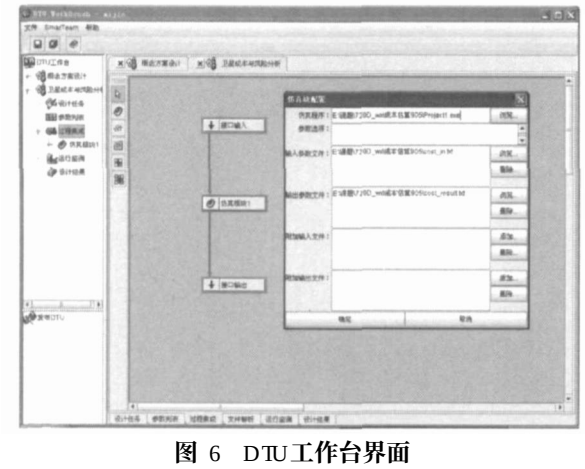


图 6 DTU工作台界面

5) 运行到优化模块时,定义设计变量上下界和初值、约束条件、选择优化目标、优化器及优化策略、设置优化结束条件等,配置完成后发布优化模块 DTU,系统可以分布式自动运行各个分析仿真模块完成优化计算.

6) 优化分析完成后,进入结果分析模块,生成设计报告. 报告内容可以包括星座方案选择和卫星概念设计所获得的主要技术参数及其分析结果图片,用户可以根据需求定制技术报告内容和输出格式. 输出格式包括 Word文档, HTML和 PDF文件 3种.

4 实 例

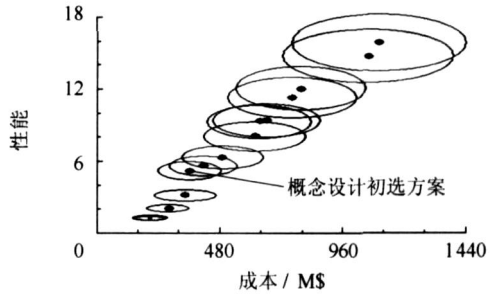
4.1 问题描述

该实例的任务要求为:由多颗小卫星组成星座实现对地面某区域观测,卫星高度在 400～1 000 km之间,4日回归周期,星座中卫星数不超过 16颗;覆盖区域为东经 100°～140°,北纬 0～45°;最大覆盖间隙 3 600 s,平均响应时间 1 800 s;单星工作寿命不少于 1.5 a.

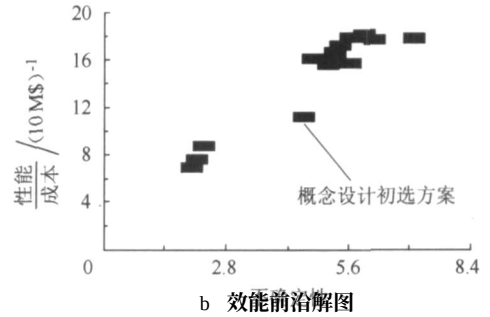
4.2 方案选择

方案选择阶段得到相关方案比较数据,成本效能图如图 7a所示,椭圆中心各个点表示由成本和总效能确定的方案的期望值,椭圆长轴和短轴分别代表各方案在成本维和效能维上的不确定性.

在完成各个方案的不确定性分析后,采用模拟退火算法得到设计前沿解 (14种设计方案),如图 7b所示.



a 带不确定性效能-成本权衡空间



b 效能前沿解图

图 7 概念方案设计分析结果图

4.3 概念设计结果

选择图 7中的“概念设计初选方案”进行概念设计,主要参数如下:轨道高度 984.464 7 km,轨道倾角 60°,轨道面数 3,每个轨道面上的卫星数 4,第 1个轨道面的升交点赤径 185°,观察角 20°.优化策略选择 iSIGHT优化器中的多岛遗传算法. 在方案选择阶段星座的基本参数如轨道高度、轨道数、卫星数等已经确定,星座的覆盖特性、重访时间等性能参数也基本确定,所以在概念设计阶段,主要是对卫星本体各子系统优化,优化目标为总成本最小. 图 8为星座总成本迭代历史曲线.

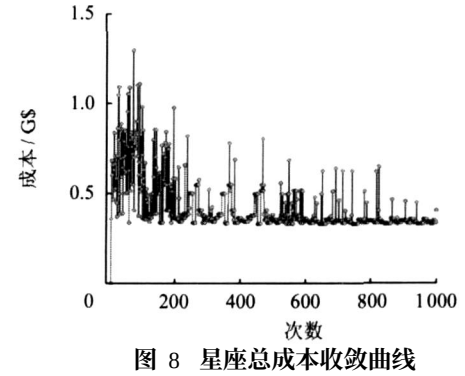


图 8 星座总成本收敛曲线

表 1列出各个优化变量的取值,并与文献[8-9]优化结果作了比较,本文结果与文献[8-9]不同的主要原因是采用设计模型的差别和选择的优化算法不同,文献[9]对卫星平台中某些子系统如通信、命令处理及热子系统质量和功耗作了粗略的估算.

表 1　概念设计设计变量及其取值

设计变量	文献[9]优化结果(分布式协同优化)		文献[8]优化结果(动态规划)		本文优化结果(多岛遗传算法)	
	可取值	最优值	可取值	最优值	可取值	最优值
控制类型	0,1,2	0(双自旋)	0,1,2	2(动量偏置)	1,2,3,4,5	3(动量偏置)
调解模式					1,2,3,4	3(BPSK)
天线类型			0,1,2,3	2(螺旋状)	1,2,3,4	2(半波偶极子)
结构长度	0.23～1.5	0.8728			0.4～0.8	0.4006
结构高度	0.45～3	1.7346			0.8～1.2	0.8832
卫星形状	0,1	0(圆柱)	0,1,2	0(长方体)	1,2,3	2(正六棱柱体)
结构材料	0,1	1(镁合金)	0,1,2,3	3(镁合金)	1,2,3,4,5	3(镁合金)
电池材料	0,1	1	0,1	1(氢化镍)	1,2	1 (镉化镍)
热涂层材料			0,1	0(白色环氧漆)	1,2,3,4,5	5 (白色环氧漆)
太阳翼材料	0,1	1	0,1	1(砷化镓)	1,2,3	2(砷化镓)
存储类型			0,1	1(磁泡存储)	1,2	2(固态存储)

5　结 束 语

将快速方案选择和概念设计方法与星座概念设计结合起来,提出卫星星座概念设计系统架构,应用 SDOF实现了星座快速方案选择和卫星概念设计,该系统可支持设计团队中成员以分布协同方式进行卫星概念设计;在方案选择部分对备选方案的性能、不确定性和风险作了定量分析,促进设计者快速、较客观地决策;并采用多岛遗传算法对卫星概念设计进行优化,与文献[8-9]的优化结果作了比较;设计完成后用户可定制设计报告内容和格式.

致谢　衷心感谢在系统调试过程中王振华、王永坡、隋鹏飞、何恒同学给予积极支持和配合.

参考文献 (References)

[1] Budianto IA, Olds J R. Design and deployment of satellite constellation using collaborative optimization[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2004, 41(6): 956-963

[2] Mcmanus H L, Hastings D E, Warmkesset J M, et al. New methods for rapid architecture selection and conceptual design [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2004, 41(1): 10-19

[3] 张建明. 机械产品概念设计的若干方法研究[D]. 大连:大连理工大学机械工程学院, 2005
Zhang Jianming. Research on methods for conceptual design of mechanical products[D]. Dalian: School of Mechanical & Engineering, Dalian University of Technology, 2005 (in Chinese)

[4] 曹东兴,檀润华,耿磊,等. 基于功能方法树的机械产品概念设计[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(6): 888-891
Cao Dongxing, Tan Runhua, Geng Lei, et al. Mechanical product conceptual design based on functional means tree[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38(6): 888-891 (in Chinese)

[5] Jilla C D, Miller D W. Multiobjective, multidisciplinary design optimization methodology for distributed satellite systems[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2004, 41(1): 39-50

[6] Walton M A, Hastings D E. Application of uncertainty analysis to architecture selection of satellite systems[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2004, 41(1): 75-84

[7] Wertz J R, Larson W J. Space mission analysis and design[M]. 3rd ed. Torrance, CA: Microcosm Press, 1999: 241-820

[8] Riddle T E. Evaluation of multidisciplonary design optimization techniques as applied to the spacecraft design process[D]. Colorado: Department of Aerospace Engineering Sciences, University of Colorado, 1999

[9] 陈琪锋. 飞行器分布式协同进化多学科设计优化方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学航天与材料工程学院, 2003
Chen Qifeng. Distributed coevolutionary multidisciplinary design optimization methods for flying vechiles[D]. Changsha: School of Aerospace & Materials Engineering, National University of Defense Technology, 2003 (in Chinese)

(责任编辑:文丽芳)