

DOI: 10.3724/zrht.1674-5825.2025113

• 工程技术 •

基于整数线性规划的Walker星座发射部署设计方法研究

朱雄峰, 王一杉, 黄紫藤, 刘 鹰
(北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘 要: 针对传统 Walker 星座发射部署方案设计中存在的设计工作量大、效率不高的问题, 本文提出了基于整数线性规划的发射部署设计方法。根据 Walker 星座的特点, 将星座发射部署方案解耦成单一轨道面的最优发射部署和星座的最优发射部署 2 个步骤。在单一轨道面最优发射部署阶段, 以运载能力、一型火箭可提供的卫星座位数量、单一轨道面运载火箭数量等为约束, 以发射成本最优为目标, 进行整数线性规划。在星座发射部署方面, 通过继承单一轨道面的最优发射方案, 叠加组网计划、火箭年发射能力、发射周期等约束, 进行整数 (0-1) 线性规划, 得到星座发射部署最优方案。结果表明, 该方法大大提高了星座发射部署的方案设计效率, 大幅减少了主观决策环节。

关键词: 运载火箭; 卫星; Walker星座; 发射场; 整数线性规划

中图分类号: V11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5825(2026)03-0394-08

Integer Linear Programming-based Design Method for Walker Constellation Deployment

ZHU Xiongfeng, WANG Yishan, HUANG Ziteng, LIU Ying

(Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: The enumeration method is traditionally used for Walker constellation deployment design; however, this approach is low efficient and generates a heavy workload. Considering these disadvantages, this study proposes an integer linear programming-based deployment design method. Based on the characteristics of the Walker constellation, the deployment design process is decoupled into two steps: (1) deployment design and optimization of the unit orbit, and (2) deployment design and optimization of the Walker constellation. In the first step, the optimization object is the minimal launch cost. The optimization constraints are that the launch vehicles must provide sufficient transport capacity for the unit orbit and appropriate positions for the satellites of the unit orbit. In the second step, the optimized unit-orbit deployment is inherited, and the optimization object is, again, the minimal launch cost. However, the optimization constraints pertain to the deployment year-plan, launch-vehicle productivity, launch period, and launch-site launch capacity. Integer linear programming is used to implement the two steps of the design process, which yields the optimized deployment of the Walker constellation. The results demonstrate that the constellation deployment design is highly efficient while the subjective decision-making process is simplified.

Key words: launch vehicle; satellite; Walker constellation; launch site; integer linear programming

1 引言

当前, 卫星设计呈两极化发展, 对多功能卫

星, 单颗卫星的功能越发强大, 卫星的质量和包络显著增加, 卫星质量大多数在吨以上, 卫星数

收稿日期: 2025-07-06; 修回日期: 2026-03-31

第一作者: 朱雄峰, 男, 博士, 副研究员, 研究方向为航天发射运输。E-mail: zhuxiongfeng@yeah.net

引用格式: 朱雄峰, 王一杉, 黄紫藤, 等. 基于整数线性规划的Walker星座发射部署设计方法研究[J]. 载人航天, 2026, 32. Zhu X F, Wang Y S, Huang Z T, et al. Integer linear programming-based design method for walker constellation deployment[J]. MANNED SPACEFLIGHT, 2026, 32.

量和轨道相对单一。对分布式星座, 卫星质量从数十公斤到数百公斤不等。分布式卫星星座健壮的体系弹性、高时间分辨率和高空间分辨率, 以及相对较低的单星研发制造成本等优势愈发明显, 因而得到越来越多的关注。目前大规模星座设计中主要有 J. G. Walker 提出的 Walker 星座设计方法和由 Ullock 和 Scioen 提出的覆盖带 (Street of Coverage, SOC) 设计方法等^[1]。上述方法是世界上公认的实现连续全球覆盖圆轨道的卫星星座的解析化设计方法^[2-4]。而在星座设计中, Walker 星座由于其简洁的表达形式、多样化的星座设计而越来越受到重视。Walker 星座的构型码为 $N/P/F:i,h$, 其中各参数分别代表星座内的卫星数量、轨道面数、相位因子、轨道倾角和轨道高度等^[5,6]。

根据近年来卫星发射部署的经验, Walker 星座的发射部署往往采用一箭数十星甚至数百星发射为主、一箭数星发射为补充、一箭一星发射为备用的手段。为快速实现大规模星座组网、最大程度调动运载火箭公司的积极性、激活发射服务市场的活力, Walker 星座的发射部署可以考虑在大/中/小型运载火箭、国/民/商运载火箭等范围内进行排列组合, 形成最优的发射部署方案^[7-9]。当星座规模较小或者备选运载火箭数量较少时, 最优发射部署方案可以通过简单枚举法得出。然而, 当星座规模较大或备选运载火箭数量较大时, 可行的发射方案将会呈指数形式增加, 传统上采用枚举法获得最优发射部署方案的方法难以高效完成此项工作。此外, 如若叠加每型运载火箭的运载能力上限、整流罩包络上限、可发射卫星的座位数量、火箭产能、发射工位发射能力等因素, 传统的枚举法可能更难得到最优的发射部署方案。

针对上述问题, 本文提出采用基于整数线性规划的星座发射部署方法, 力图在多种约束条件下快速获得最优的发射部署方案, 为星座总体设计、工程实施和建设运营等提供技术支持。

2 发射部署方法

由于 Walker 星座的各轨道面卫星数量和质量相同, 卫星轨道倾角、轨道高度、半长轴、偏心率相同, 各轨道面之间不相同的是升交点赤经、过近拱点指向、过近拱点时间等。使用运载火箭发射卫星, 升交点赤经、过近拱点指向、过近拱

点时间仅影响运载火箭发射窗口的选定, 而不会影响运载火箭是否能执行该轨道发射任务。因此, Walker 星座的整个星座发射部署最优方案应是尽可能取得单轨道面的最优发射部署方案。在单轨道面的最优发射部署方案确定后, 不能单纯地将该方案用到整个星座的发射部署中。其原因在于, 通常情况下, Walker 星座的发射部署时间持续数年甚至数十年, 受到发射工位建设、火箭产能建设、火箭更新换代、同期国家重大发射任务等诸多因素影响, 随后的历年发射部署中, 每一个轨道面的发射往往都不一定能采用最优的发射部署方案, 而可能退而求其次地采用次优甚至次次优的发射部署方案^[10-12]。基于上述分析, Walker 星座的发射部署方案设计由 2 个步骤组成, 第一个步骤是单一轨道面的火箭选型和部署方案优化, 第二个步骤是多个轨道面 (整个星座) 的火箭选型和部署方案优化^[13]。此外, 火箭发射卫星时由于调整轨道倾角、调整高度等将导致运载能力损失巨大, 一般火箭发射卫星都对应指定轨道倾角和轨道高度。基于该约束, 多重 Walker 星座构型的最优发射可以解耦为每个 Walker 星座的最优发射。

2.1 单轨道面发射部署优化

对于单轨道面的卫星发射部署, 核心任务是采用备选的运载火箭将同轨道面的所有卫星发射至预定轨道面, 核心要求是实施该任务的总发射成本最低。考虑到不同运载火箭可发射的卫星质量、数量不同, 火箭发射成本不同, 因此该问题等价于在众多备选火箭中进行排列组合, 形成若干火箭组合方案, 在完成发射任务的同时, 使发射成本最低。求解该数学问题需采用整数线性规划方法^[14-16], 该数学问题描述如式 (1) 所示。

$$\begin{aligned} & \min \mathbf{f}^T \mathbf{X} \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \mathbf{A} \cdot \mathbf{X} \leq \mathbf{b} \\ \mathbf{A}_{eq} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{b}_{eq} \\ \mathbf{lb} \leq \mathbf{X} \leq \mathbf{ub} \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

优化目标 $\mathbf{f}^T \mathbf{X}$: 在满足单一轨道面发射部署任务的要求下, 所选运载火箭组合的发射成本最低 (包括火箭产品费、发射测控服务费、推进剂费等)。其中 $\mathbf{f}$ 为火箭的成本向量, 例如, $\mathbf{f} = [1, 2, 3, \dots]$ 表明火箭 1 的单发成本为 1 亿元人民币, 火箭 2 的单发成本为 2 亿元人民币, 火箭 3 的单发成本为 3 亿元人民币。

优化变量 $\mathbf{X}$ 是备选运载火箭及其数量, 该优化变量为整数向量, 例如, $\mathbf{X}=[0,1,2,\dots]$, 该发射方案中火箭 1 的数量为 0 发, 火箭 2 的数量为 1 发, 火箭 3 的数量为 2 发。

优化约束: 包括等式约束 $\mathbf{Aeq} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{beq}$ 、不等式约束 $\mathbf{A} \cdot \mathbf{X} \leq \mathbf{b}$ 和上下限约束 $\mathbf{lb} \leq \mathbf{X} \leq \mathbf{ub}$, 其中: ①等式约束中 $\mathbf{Aeq}$ 是等式约束矩阵, $\mathbf{beq}$ 是等式约束向量, 对于单轨道面卫星发射部署优化问题, 不需要用到等式约束, 因此该约束矩阵和向量不需要赋值。②不等式约束中 $\mathbf{A}$ 是不等式约束矩阵, $\mathbf{b}$ 是不等式约束向量, 主要限定发射方案中所有运载火箭可提供的卫星座位数量之和不少于单轨道面卫星数量, 以及发射方案中所有运载火箭提供的目标轨道运载能力 (包括卫星支架和分离机构质量等) 之和不少于单轨道面所有卫星的质量之和。③上下限约束中, $\mathbf{lb}$ 是约束下限向量, $\mathbf{ub}$ 是约束上限变量, 主要限定发射方案中可提供运载火箭的数量上下限, 例如, $[0,0,0,\dots] \leq \mathbf{X} \leq [0,1,2,\dots]$ 表明火箭 1 的可选数量为 0, 火箭 2 的可选数量最大为 1 发, 火箭 3 的可选数量最大为 2 发。

求解该类整数线性规划问题, 往往可以采用 MATLAB 自带的 `Intlinprog` 函数。在实际优化过程中, 通常能得到一个最优化方案。考虑到工程实际, 除得到最优化方案外, 还需获得次优方案和次次优方案等。在这种情况下, 可以通过设置上下限约束强行让某型火箭可用数量为 0, 再次执行优化得到次优方案, 同理可得到次次优方案。

2.2 多轨道面 (整个星座) 发射部署优化

对于多轨道面发射部署, 前提在于前述单轨道面发射部署已完成优化, 得到若干最优或次优的发射部署方案。其核心任务是综合考虑星座数年的发射部署时间内, 发射工位建设、火箭产保能力等因素, 在每一轨道面中择优选择上述单轨发射部署方案, 在完成多轨道面的发射部署情况下, 使发射成本最低。求解该数学问题同样需要采用整数线性规划, 如式 (1) 所示。与单轨道面整数线性规划所不同的是, 多轨道面整数线性规划是将单轨道面的最优、次优等方案套用到整个星座的各个轨道面中, 因此其优化变量只能是 0 或 1, 是典型的整数 (0-1) 线性规划。

优化目标 $\mathbf{f}^T \mathbf{X}$: 在满足星座发射部署任务要

求的情况下, 选用的所有运载火箭发射成本之和最小。其中, $\mathbf{f}$ 为单轨道面发射方案的成本向量。

优化变量 $\mathbf{X}$: 单轨道面各优选方案的选择和分布, 例如, 在存在最优、次优和次次优单轨发射方案的情况下, $\mathbf{X}=[0,1,0,1,0,0,\dots]$ 表明星座组网方案中, 第一个轨道面采用次优发射方案, 第二个轨道面采用最优发射方案。需要指出的是, 对于任一轨道面, 只能采用一种发射部署方案, 因此优化变量的顺序为每 3 个数中仅有 1 个赋值 1, 另外 2 个赋值 0。

优化约束: ①不等式约束, 即星座部署方案中, 任一运载火箭的年选用数量既不能大于该火箭在发射工位的剩余年发射能力, 也不能大于该火箭的年产能阈值, 同时, 每年总发射周期应小于目标值; ②上下限约束, 由于多轨道面发射部署方案采用整数 (0-1) 线性规划, 因此优化变量的下限为 0, 上限为 1; ③等式约束, 即每个轨道面必须且只能选择 1 种发射方式。

同样, 求解该类整数线性规划也采用 MATLAB 自带的 `Intlinprog` 函数。图 1 是基于整数线性规划的 Walker 星座发射部署设计流程。

3 设计实例

3.1 单轨道面发射部署优化

假定某 Walker 星座的构型码为 1000/10/1: 50, 1000, 这表明该 Walker 星座总数量 1000 颗, 10 个轨道面, 轨道倾角 50° , 轨道高度 1000 km。对于单轨道面发射部署, 其他要求如下: 每个轨道面需要从现有 8 型运载火箭中选用不超过 3 型运载火箭, 形成 1 个发射方案; 单一轨道面卫星数量 100 颗, 即要求上述组合形成的发射方案, 所有运载火箭可提供的卫星座位数量应不少于 100 个; 总质量为 10 000 kg, 即要求上述组合形成的发射方案, 所有运载火箭可提供的目标轨道运载能力之和不少于 10 000 kg。

其中 8 型运载火箭的基本情况如表 1 所示。表格中, 运载火箭的核心能力分别是目标轨道的运载能力、可提供的卫星座位数量、发射成本等。如火箭 1, 其目标轨道的运载能力为 2000 kg、可提供卫星座位数量为 18 个, 发射成本是每发 1.1 亿元人民币。

针对上述单轨道面的发射部署要求, 结合表 1

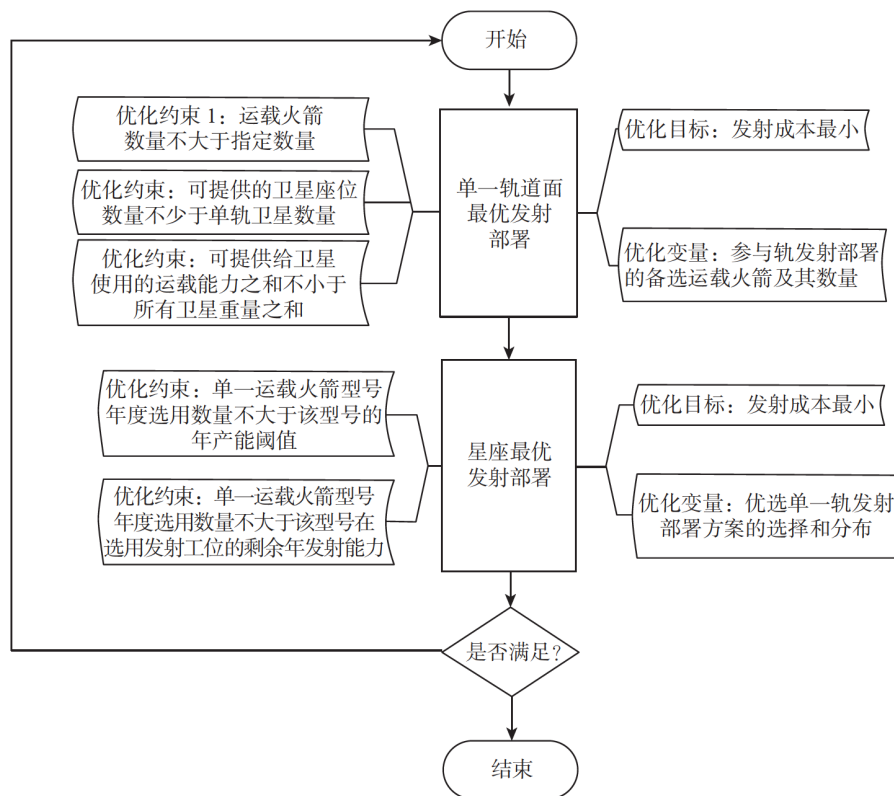


图 1 发射部署设计流程

Fig. 1 Launch and deployment design process

表 1 8 型运载火箭基本情况

Table 1 Basic setup of 8 launch vehicles

序号	X	运载火箭	运载能力/kg	卫星座位数量/颗	发射成本/亿	发射周期/d
1	x_1	火箭1	2000	18	1.1	15
2	x_2	火箭2	2000	19	1.2	15
3	x_3	火箭3	4000	40	1.3	15
4	x_4	火箭4	4000	41	1.4	15
5	x_5	火箭5	6000	75	2.0	20
6	x_6	火箭6	7000	85	3.0	20
7	x_7	火箭7	7000	90	2.5	25
8	x_8	火箭8	14000	115	8.0	35

中 8 型运载火箭的基本情况, 对照单轨道面整数线性规划数学描述式 (1), 可以得出参数化的数学描述如下。

1) 优化目标。单轨道面的优化目标 $f^T X$ 为单一轨道面的发射成本最小, 因此发射成本向量 f^T 为 8 型运载火箭的发射成本组成的横向量, 如式 (2) 所示。

$$f^T = [1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 2.0, 3.0, 2.5, 8.0] \quad (2)$$

2) 优化变量。单轨道面的优化变量 X 为单一轨道面的各型运载火箭的选择, 因此这里优化变

量应为 8 型运载火箭的选择与否, 以及选用的数量, 其为整数列向量。

3) 不等式约束。单轨道面的不等式约束包括以下 3 个方面: ①组合形成的发射方案, 所有运载火箭的运载能力之和不小于 10 000 kg; ②组合形成的发射方案提供的总卫星座位数量不少于 100 个; ③组合形成的发射方案总运载火箭数量不大于 3 发。根据上述约束要求, 结合数学描述式 (1), 可以得出不等式约束的 2 个向量, 如式 (3)、式 (4) 所示。

$$A = \begin{bmatrix} 2000, 2000, 4000, 4000, 6000, 7000, 7000, 14000 \\ 18, 19, 40, 41, 75, 85, 90, 115 \\ -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{b} = - \begin{bmatrix} 10000 \\ 100 \\ -3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

4) 上下限约束。单轨发射部署上限约束缺省。

5) 等式约束。单轨发射部署等式约束缺省。使用 MATLAB 自带的 Intlinprog 函数执行整数线性规划, 可得到最优发射部署方案(方案 1), 即采用 1 发火箭 3+1 发火箭 5 的组合, 即可完成单轨道 100 颗卫星的发射任务, 单轨道面发射成本 3.3 亿元人民币。根据工程需要, 通过强行将火箭 5 的可用数量赋值为 0, 再次执行整数线性规划, 可得到次优发射部署方案(方案 2), 即采用 1 发火箭 3+1 发火箭 7 的组合, 即可完成单轨道 100 颗卫星的发射任务, 单轨道面发射成本 3.8 亿元人民币。同样地, 通过强行将火箭 5、火箭 7 的可用数量赋值 0, 再次执行整数线性规划, 可得到次优的发射部署方案(方案 3), 即采用 3 发火箭 3 的组合, 即可完成单轨道 100 颗卫星的发射任务, 单轨道面的发射成本 3.9 亿元人民币。3 种方案的组合形式、运载火箭数量和发射成本如表 2 所示。

表 2 单轨道面发射部署方案

Table 2 Single-orbit launch and deployment scheme

名称	选用 运载火箭	火箭 数量/枚	发射 成本/亿	发射 周期/d
方案1	1发火箭3+1发火箭5	2	3.3	35
方案2	1发火箭3+1发火箭7	2	3.8	40
方案3	3发火箭3	3	3.9	45

3.2 多轨道面（整个星座）发射部署优化

对构型码为 1000/10/1: 50, 1000 的 Walker 星座, 在单轨道面发射部署阶段, 在各种约束下已得到 3 个发射部署优化方案。理论上, 对于多轨道面 (整个星座) 的发射部署, 其 10 个轨道面的发射均采用单轨道面的最优发射部署方案。然而在工程实践中, 每型火箭的产能并不能无限制保障; 同样地, 每年各发射场的发射工位、发射能力也不能无限制提供。受限于上述约束以及卫星产能约束, 对于该 Walker 星座, 工程总体要求分 3 年完成发射任务, 即第 1 年完成 4 个轨道面的部署, 第 2 年和第

3年各完成3个轨道面的部署。表3所示是该星座发射部署的年度安排。从表格中可以看出,多轨道面的发射部署,等价于在单轨道面3个备选发射方案中选择合适的发射方案。此外,各型火箭受到产能和发射工位能力的约束,在单轨道面3个优化方案中,涉及火箭3、火箭5和火箭7,这3型火箭分3个年度的产能和发射能力约束如表4所示。

表 3 星座发射部署年度安排

Table 3 Launch and deployment year-plan arrangement of Walker constellation

变量	第1年				第2年			第3年		
	1轨	2轨	3轨	4轨	5轨	6轨	7轨	8轨	9轨	10轨
X	x_1	x_4	x_7	x_{10}	x_{13}	x_{16}	x_{19}	x_{22}	x_{25}	x_{28}
	x_2	x_5	x_8	x_{11}	x_{14}	x_{17}	x_{20}	x_{23}	x_{26}	x_{29}
	x_3	x_6	x_9	x_{12}	x_{15}	x_{18}	x_{21}	x_{24}	x_{27}	x_{30}
	$X=[x_1, x_2, \dots, x_{30}], x_i \in [0, 1]$									

表 4 3 型火箭的产能和发射能力约束

Table 4 Productivity and launch capability constraints of 3 launch vehicles

火箭	第1年/发	第2年/发	第3年/发
火箭3	20	20	20
火箭5	1	1	2
火箭7	3	3	20

针对多轨道面的发射部署要求, 结合表3、表4的发射部署年度安排和能力约束, 该问题同样为整数线性规划问题, 对照整数线性规划数学描述式(1), 得出参数化的数学描述如下。

1) 优化目标。多轨道面的优化目标 $f^T X$ 为整个星座的发射成本最小, 对照表 3, 发射成本向量 f^T 为长度为 30 的横向量, 如式 (5) 所示。其中, 向量长度为 3 型备选单轨道面发射方案与 10 个轨道面的乘积。根据表 2 单轨发射方案的 3 个方案, 可以初步判断出, 多轨道面发射部署的最低发射成本为 33 亿元人民币, 最高发射成本为 39 亿元人民币。

[illegible]

2) 优化变量。多轨道面的优化变量 $\mathbf{X}$ 为每一轨道面对 3 种单轨道面发射部署方案的选择, 这里优化变量为 3 种发射部署方案的选择与否, 因此变量仅能从整数 0 和 1 中选取, 是整数线性规划的特殊形式, 即整数 (0-1) 线性规划。与发射成本向量类似, 优化变量为长度 30 的列向量。

3) 不等式约束。多轨道面的不等式约束主要见表4, 其中, 火箭3历年均可以提供20发的能力。火箭5受限于新火箭和新工位, 第1年和第2

年能提供 1 发的能力, 第 3 年能提供 2 发的能力。火箭 7 同样受限于新火箭和新工位, 第 1 年和第 2 年能提供 3 发的能力, 第 3 年能提供 20 发的能力。此外, 考虑到建设时效性, 第 1 年总发射周期不大于 160 d, 第 2 和第 3 年总发射周期不大于 180 d。

根据上述约束, 结合数学描述式(1)得出不等式约束的矩阵和向量, 如式(6)和(7)所示。

[illegible]

$$\mathbf{b} = [20, 0, 0, 20, 0, 2, 20, 2, 20, 160, 180, 180]^T \quad (7)$$

4) 等式约束。多轨道面的等式约束主要为 10 个轨道面可以选择 3 种备选发射方案, 但每个轨道面仅能从 3 种备选方案中选择一种。例如, 对

于第一轨道面, 要求 $x_1+x_2+x_3=1$, 同理, 剩余的 9 个轨道面也有同样的等式约束。根据该约束, 结合数学描述式 (1), 得出等式约束的矩阵和向量, 如式 (8) 和 (9) 所示。

[illegible]

$$\mathbf{beq} = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]^T \quad (9)$$

5) 上下限约束。多轨道面的上下限约束主要如前所述, 该优化是整数线性规划的特殊形式,

[illegible]

[illegible]

在多轨道面发射的参数化数学描述的基础上, 同样使用 MATLAB 自带的 Intlinprog 函数执行整

即整数 (0-1) 线性规划。为此, 优化变量仅能从 0 和 1 中选取。根据该约束, 结合数学描述式 (1), 可以得出上下限约束的 2 个向量, 如式 (10) 和 (11) 所示。

数线性规划, 可得到最优的发射部署方案, 如表 5 所示。从表格可知, 第 1、7、9、10 轨道面选择

表 5 星座发射部署最优方案

Table 5 Optimal Walker-constellation launch deployment solution

第1年				第2年			第3年		
1轨	2轨	3轨	4轨	5轨	6轨	7轨	8轨	9轨	10轨
方案1	方案2	方案2	方案2	方案2	方案2	方案1	方案2	方案1	方案1

单轨道发射备选方案 1, 第 2、3、4、5、6、8 轨道面选择单轨道发射备选方案 2。第 1 年总发射周期 155 d, 第 2 年总发射周期 115 d, 第 3 年总发射周期 110 d。10 个轨道面总发射成本 36 亿元人民币, 相比最高发射成本 39 亿元人民币, 节省了 3 亿元人民币。

以上星座发射部署方案设计需要以现有运载火箭的技术状态作为输入。考虑到在星座组网过程中会出现运载火箭升级换代、能力提升、效率提升的情况, 或者会出现新型运载火箭, 因此, 在历年组网过程中, 当火箭技术状态发生变化时, 需要进行动态调整, 重新优化计算, 以获取当前最优的发射部署方案。

4 成效及展望

通过基于整数线性规划的 Walker 星座发射部署方法研究, 并初步应用于卫星工程实践, 本研究取得了较好的使用效果。

1) 为星座工程总体设计提供高效设计手段。中国传统卫星发射部署通常采用长征系列运载火箭, 考虑到运载火箭在各轨道类型的任务分工, 实际承担某特定轨道的发射任务仅有 1~3 型运载火箭可选, 因此可以采用简单的枚举法得到最优的发射方案。然而, 随着商业航天的蓬勃兴起, 各种商业运载火箭如雨后春笋般涌现, 未来数年预计将有十数型运载火箭具备承担星座工程发射任务的能力, 叠加传统长征系列运载火箭, 可供选择的运载火箭甚至可能达到 20 余种。对单轨道面发射任务, 可能存在上百种可行的组合发射方案, 传统的枚举法得到最优发射方案的工作量巨大、效率不高, 同时可能存在遗漏优化方案的可能性。本文提出采用整数线性规划寻求最优数学解, 得到最优发射部署方案, 决策效率高, 且不受备选运载火箭数量增加的影响, 因此可以为星座工程总体设计提供高效的设计手段。

2) 为星座工程总体设计提供技术决策支撑。

在星座发射部署方法设计中, 除备选运载火箭数量增加带来可行解指数式增加的问题外, 还存在大量的非技术约束问题。如火箭的研制进度和成熟度、火箭产保能力、发射工位建设、火箭更新换代、同期国家重大发射任务等非技术约束因素。例如, 受火箭新老更替要求, 同样可实施单轨道面发射任务, 需要向新火箭倾斜。再如, 为支持商业航天发展, 需要拿出部分轨道面定向采用商业运载火箭。上述非技术因素中, 如若仅存在 1~2 个非技术因素, 可采用枚举法得到星座的最优发射部署方案, 当非技术因素大量增加并存在相互耦合影响时, 枚举法往往难以得到最优解, 在工程实践中通常需要工程总体或工程总师进行主观决策。本文提出的整数线性规划方法用于星座发射部署方案设计, 可将所有的非技术约束转化成不等式约束、等式约束和上下限约束等。因此, 决策过程不受主观意志干扰, 可以得出较为客观的优选方案。

5 结论

本文针对 Walker 星座发射部署设计中传统枚举法得到最优发射方案工作量大、效率低的问题, 提出了基于整数线性规划的星座发射部署方法。

1) 将星座发射部署分成 2 个步骤, 第一步是单轨道面的发射部署方案设计和优化, 第二步是多轨道面的发射部署方案设计和优化。通过 2 个解耦的步骤, 实施 2 次整数线性规划可以得到星座发射部署方案。

2) 通过设计实例验证了该方法流程可靠、方法可行。

3) 采用整数线性规划进行星座发射部署方案设计, 可为星座工程总体设计提供高效设计手段, 同时可为星座工程总体设计提供技术决策支撑, 具有较好的工程应用前景。

参考文献 (References)

- [1] 计晓彤, 丁良辉, 钱良, 等. 全球覆盖低轨卫星星座优化设计研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(9): 64: 69.
Ji X T, Ding L H, Qian L, et al. Optimization of global coverage LEO satellite constellation design[J]. Computer Simulation, 2017, 34(9): 64: 69 (in Chinese).
- [2] 薛向宏, 宋天航, 张友民, 等. 一种面向低轨导航增强星座优化的非支配排序遗传算法[J]. 宇航学报, 2025, 46(6):

- 1214-1227. Xue X H, Song T H, Zhang Y M, et al. A non-dominated sorting genetic algorithm for low earth orbit navigation augmentation constellation optimization[J]. Journal of Astronautics, 2025, 46 (6): 1214-1227 (in Chinese).
- [3] 李明铭, 郭帅, 朱阅詠, 等. 应急观测星座优化设计: ATK二次开发技术的应用[J]. 国防科技大学学报, 2025, 47 (4): 42-51.
- Li M M, Guo S, Zhu Y H, et al. Optimization design of emergency observation constellation: application of ATK secondary development technology[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2025, 47 (4): 42-51 (in Chinese).
- [4] 康会峰, 蒋亚航, 王刚, 等. 低轨Walker观测星座构型设计方法研究[J]. 北华航天工业学院学报, 2024, 34 (1): 1-5.
- Kang H F, Jiang Y H, Wang G, et al. Configuration design method of low-orbit walker constellation observation[J]. Journal of North China Institute of Aerospace Engineering, 2024, 34 (1): 1-5 (in Chinese).
- [5] 李胜西, 李海阳, 何湘粤. 面向全球快速重访的限制性Walker星座设计方法[J]. 系统工程与电子技术, 2024, 46 (12): 4149-4156.
- Li S X, Li H Y, He X Y. Design method of restricted Walker constellation for global rapid revisit[J]. Systems Engineering and Electronics, 2024, 46 (12): 4149-4156 (in Chinese).
- [6] 张晨, 朱政帆. 天基态势感知星座构型设计[J]. 计算机仿真, 2023, 40 (12): 93-98, 107.
- Zhang C, Zhu Z F. Optimizing design for constellation configuration of space-based space situation awareness[J]. Computer Simulation, 2023, 40 (12): 93-98, 107 (in Chinese).
- [7] 朱雄峰, 刘阳, 刘鹰, 等. 中国运载火箭型谱发展[J]. 科技导报, 2023, 41 (19): 16-28.
- Zhu X F, Liu Y, Liu Y, et al. Study on launch vehicle spectrum programming of China[J]. Science & Technology Review, 2023, 41 (19): 16-28 (in Chinese).
- [8] 朱雄峰, 程洪玮, 刘阳, 等. 世界航天发射运输的发展趋势[J]. 科技导报, 2021, 39 (11): 46-58.
- Zhu X F, Cheng H W, Liu Y, et al. Review and development perspective of the space launch and transportation system[J]. Science & Technology Review, 2021, 39 (11): 46-58 (in Chinese).
- [9] 朱雄峰, 周城宏, 雍子豪, 等. 垂直起降重复使用运载火箭总体设计优化方法研究[J]. 载人航天, 2024, 30 (2): 197-205.
- Zhu X F, Zhou C H, Yong Z H, et al. Conceptual design optimization method of vertical launch and landing reusable rockets[J]. Manned Spaceflight, 2024, 30 (2): 197-205 (in Chinese).
- [10] 刘鹰, 吴枫, 彭威, 等. 面向多星异轨部署的航天发射任务规划方法[J]. 航天技术与工程学报, 2025, 2 (3): 91-100.
- Liu Y, Wu F, Peng W, et al. Space launch mission planning method for multi-satellite heterogeneous orbit deployment[J]. Journal of Space Technology and Engineering, 2025, 2 (3): 91-100 (in Chinese).
- [11] 湛廷政, 李晓超, 张腾. 智能自主航天发射关键技术分析[J]. 航天技术与工程学报, 2025, 2 (3): 84-90.
- Chen T Z, Li X C, Zhang T. Analysis of key technologies for intelligent autonomous space launch[J]. Journal of Space Technology and Engineering, 2025, 2 (3): 84-90 (in Chinese).
- [12] 王杰, 钟文安, 俞少行, 等. 某航天发射场射后恢复流程优化研究[J]. 导弹与航天运载技术 (中英文), 2025 (3): 45-53.
- Wang J, Zhong W A, Yu S X, et al. Optimization study for post-launching recovery process of a space launch site[J]. Missiles and Space Vehicles, 2025 (3): 45-53 (in Chinese).
- [13] 朱雄峰, 王一杉, 崔朋, 等. 一种Walker星座发射部署设计方法: 中国, CN202411840742.5[P]. 2025-03-11.
- Zhu X F, Wang Y S, Cui P, et al. A launch deployment design method for Walker constellation: China, CN202411840742.5[P]. 2025-03-11 (in Chinese).
- [14] 张泉, 郑浩然, 朱逸群, 等. 基于混合整数规划的数据中心冷却能耗优化[J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2024, 51 (9): 188-197.
- Zhang Q, Zheng H R, Zhu Y Q, et al. Optimization of cooling energy consumption in data centers based on mixed integer programming[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2024, 51 (9): 188-197 (in Chinese).
- [15] 魏小淤, 吴蓓婷, 张君俊. 基于混合整数线性规划的新能源电解水制氢项目容量配置优化建模[J]. 电力勘测设计, 2024 (5): 1-4.
- Wei X Y, Wu B T, Zhang J J. Optimal modeling of capacity allocation for new energy electrolytic hydrogen production project based on mixed integer linear programming[J]. Electric Power Survey & Design, 2024 (5): 1-4 (in Chinese).
- [16] 年浩, 孙鹏飞, 冷旭, 等. 基于整数线性规划的飞行日计划自动排列算法[J]. 舰船电子工程, 2024, 44 (3): 106-109.
- Nian H, Sun P F, Leng X, et al. An algorithm for automatic arrangement of flight day plans based on integer linear programming[J]. Ship Electronic Engineering, 2024, 44 (3): 106-109 (in Chinese).

(责任编辑: 周鹏)