

引用格式:解卫华,韩晓建.多约束飞机设备舱布局设计方法[J].电光与控制,2018,25(8):101-105. XIE W H, HAN X J. Layout design for aircraft equipment cabin based on multi-constraint handling[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(8):101-105.

多约束飞机设备舱布局设计方法

解卫华¹, 韩晓建²

(1.台州科技职业学院,浙江台州 318020; 2.北京航空航天大学,北京 100191)

摘要:如何在飞机设备舱有限空间内对设备进行布局优化,并且能满足各类布局约束要求,是一个很难找到最优解的NP完全问题。将该问题抽象为三维布局问题,就此提出一种针对多类约束处理的布局设计方法,用于求解飞机设备舱布局设计问题。首先根据约束物体的可布局空间及其重要性,确定布局物体约束优先级,根据优先级高低按照一定约束矢量进行布局,其次,根据优化目标和搜索方法对无约束物体进行分类分组和预处理,模拟实际布局实现每步最优,解决无约束物体布局问题,同时采用人机结合微调布局,以达到布局的有序性和目的性。

关键词:飞机设备舱;多约束处理;布局设计

中图分类号:V271.4; TP391.72 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.08.021

Layout Design for Aircraft Equipment Cabin Based on Multi-constraint Handling

XIE Wei-hua¹, HAN Xiao-jian²

(1. Taizhou Vocational College of Science and Technology, Taizhou 318020, China; 2. Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The layout optimization of aircraft equipment cabins in limited space with various requirements of layout constraints is a complete NP problem to which is difficult to find an optimal solution. This problem is abstracted as a three-dimensional layout problem. This paper presents a new method for layout designing based on multi-constraint handling to solve the layout design problem. Firstly, the layout constraint priority is determined according to the layout space and the importance of constrained objects, and then the constrained objects are laid out with certain constraint vectors in order of priority. Secondly, unconstrained objects are grouped into categories and preprocessed according to the optimization goal and searching methods. The real layout is simulated to achieve the optimum in every step, so that the unconstrained object layout problem can be solved. Finally, the method of human-computer combination is used for tuning the layout, in order to achieve the orderliness and purposefulness of the layout design.

Key words: aircraft equipment cabin; multiple constraints handling; layout design

0 引言

随着现代飞机设备舱功能的不断发展,机载设备越来越多,设备舱内设备的布置也越来越复杂。要在飞机设备舱有限的空间内满足载重、散热、供电、电磁等要求,是一个带约束的布局问题。

飞机的舱室布局问题本质上是带约束的三维布局问题。国内外学者在解决无约束三维空间布局问题上做了大量的研究和探索,典型的方法有启发式算法、拟

物拟人算法和混合式算法等。文献[1]在带动不平衡约束卫星舱布局中采用启发式算法;文献[2]利用粒子群算法对多舱段进行组件的布局设计;文献[3-4]采用模拟退火算法解决发动机舱布局设计问题;文献[5]提出求解卫星舱布局问题的分治混合算法;文献[6]采用协同差分进化算法解决卫星舱的布局问题;文献[7]采用拟物算法求解长方体 Packing 问题,在布局效果和效率上都取得了很好的研究进展。学术界在有约束布局的问题上开展研究较少,近些年才开始关注和研究。文献[8]采用聚块算法依据物体间的约束关系定义布局模块,再利用布局模块进行布局;文献[9]在约束的处理问题上,归纳了很多种约束,并应用于家居设计;文献[10]是在对装配关系进行抽象的基

收稿日期:2018-03-07

修回日期:2018-05-08

作者简介:解卫华(1985—),男,浙江台州人,硕士,讲师,研究方向为CAD/CAM。

基础上,利用三维约束与驱动实现概念化设计阶段的空间布局设计。

总体上,针对飞机设备舱复杂多约束情况下的三维布局问题研究,特别是把复杂约束集形式化、有效地结合到布局算法中的布局研究不够充分。针对飞机设备舱三维布局问题提出一种基于多约束形式化处理的布局设计方法,以期解决上述问题。

1 布局模型

1.1 飞机设备舱的模型建立

根据飞机前设备舱和电子设备舱原型,本文将飞机设备舱室抽象为阶梯式容器,具体模型如图 1 所示。

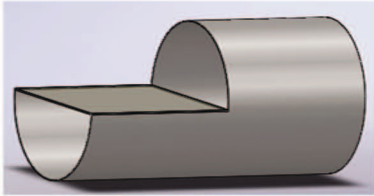


图 1 飞机设备舱简化图

Fig. 1 Simplified aircraft cabin

为了使算法能快速处理不同形状的物体,把所有的待布局物体都简化为长方体和圆柱体。每个布局物体有 6 个自由度,即 $\varepsilon(X_i, Y_i, Z_i, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$ 。各变量含义为: X_i 为物体在 X 方向的坐标; Y_i 为物体在 Y 方向的坐标; Z_i 为物体在 Z 方向的坐标; α_i 为物体绕 X 轴的角度; β_i 为物体绕 Y 轴的角度; γ_i 为物体绕 Z 轴的角度。

设整个飞机设备舱中的布局物体数量为 N ,那么这些物体的集合构成待布局物体集 $B = (B_0, B_1, B_2, B_3, \dots, B_N)$, B_0 代表飞机设备舱的容器, B_N 代表待布局物体。 $(L_{i,x}, L_{i,y}, L_{i,z})$ 为布局物体在 X, Y, Z 方向上的长度。

1.2 飞机设备舱体的布局准则

优化布局方案应满足的基本准则为:1) 所有待布局物体布局后的外包络面围成的体积为最小;2) 物体与物体之间或物体与外容器之间不发生干涉;3) 布局后系统的质心要接近预定的坐标位置,且偏差要小于许用值;4) 满足各类约束条件的要求。

2 约束处理

2.1 约束的描述

根据不同的布局约束条件,约束分为以下两种。

1) 布局本身约束。分为点约束、线约束和面约束,其对应的自由度分别为 3(3 个转动),4(在线上的位置平移和 3 个转动自由度),5(在面上的 2 个移动以及 3 个相对旋转自由度)。

2) 相对约束。分为对称约束、定距约束等。对称约束自由度应该大于面约束,其自由度大于 5,只是处理比较复杂。定距约束即待布局物体存在确定的距离要求,确定的距离约束可以转换成点约束,相当于 3 个自由度,距离远的约束在一定的布局空间可布局空间比较大。

2.1.1 物体自身的约束

1) 物体本身在布局容器的位置和姿态位置要求如下

$$\begin{cases} B_{i,x} = x_i \\ B_{i,y} = y_i \\ B_{i,z} = z_i \end{cases} \quad (1)$$

式中: $(B_{i,x}, B_{i,y}, B_{i,z})$ 表示第 i 个布局物体的坐标原点在布局容器中的位置; (x_i, y_i, z_i) 表示该物体在布局容器中的坐标值。

姿态要求为

$$\begin{cases} B_{i,\alpha} = \alpha_i \\ B_{i,\beta} = \beta_i \\ B_{i,\gamma} = \gamma_i \end{cases} \quad (2)$$

式中: $(B_{i,\alpha}, B_{i,\beta}, B_{i,\gamma})$ 表示第 i 个布局物体相对 X, Y, Z 轴旋转角度, α_i, β_i 和 γ_i 表示角度值。

2) 物体约束在某条轴线上。

$$\begin{cases} B_{i,x} = m_i \times t + m_{i0} \\ B_{i,y} = n_i \times t + n_{i0} \\ B_{i,z} = l_i \times t + l_{i0} \end{cases} \quad (3)$$

式中: t 为系数; (m_i, n_i, l_i) 表示容器内某条直线的向量; (m_{i0}, n_{i0}, l_{i0}) 表示直线上的一点,同时也可以处理约束中的共线的问题,即令 $(m_i, n_i, l_i) = (m_j, n_j, l_j)$, $(m_{i0}, n_{i0}, l_{i0}) = (m_{j0}, n_{j0}, l_{j0})$ 。

3) 在飞机设备舱内某面板上。

$$m_i \times (B_{i,x} - m_{i0}) + n_i \times (B_{i,y} - n_{i0}) + l_i \times (B_{i,z} - l_{i0}) = 0 \quad (4)$$

式中, (m_i, n_i, l_i) 表示舱室内某平面的法向向量, (m_{i0}, n_{i0}, l_{i0}) 表示直线上的一点,同时也可以处理约束中的共面的问题,即令 $(m_i, n_i, l_i) = (m_j, n_j, l_j)$, $(m_{i0}, n_{i0}, l_{i0}) = (m_{j0}, n_{j0}, l_{j0})$ 。

2.1.2 物体之间的约束

1) 定距约束,比如电、磁等,需要保持一定的距离,为此建立下面模型

$$\begin{cases} B_{i,x} = B_{j,x} + m_{ij} \\ B_{i,y} = B_{j,y} + n_{ij} \\ B_{i,z} = B_{j,z} + l_{ij} \end{cases} \quad (5)$$

式中, (m_{ij}, n_{ij}, l_{ij}) 表示两物体 i, j 相对距离矢量的分量。

2) 对称约束,在本文中分为关于 XY, YZ, XZ 面对称。

$$\begin{cases} B_{i,X} = B_{j,X} \\ B_{i,Y} = B_{j,Y} \\ B_{i,Z} = -B_{j,Z} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} B_{i,X} = -B_{j,X} \\ B_{i,Y} = B_{j,Y} \\ B_{i,Z} = B_{j,Z} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} B_{i,X} = B_{j,X} \\ B_{i,Y} = -B_{j,Y} \\ B_{i,Z} = B_{j,Z} \end{cases} \quad (8)$$

2.2 约束关联

根据上述约束关系建立如图 2 所示的约束树。

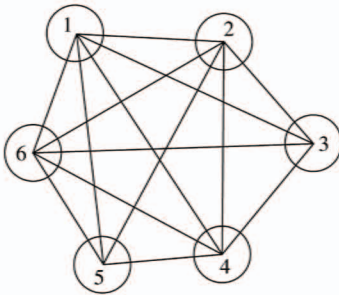


图 2 约束相互联系图

Fig. 2 Constraints relationship tree

$G_i = (B_i, R_i)$, B_i 表示布局物体, R_i 表示与其他布局物体的约束关系, 是一个向量, $R_i = |R_{i0}, R_{i1}, \dots, R_{iN}|$, 其中, $R_{ij} = \begin{cases} r & \text{存在约束类型} \\ 0 & \text{不存在约束} \end{cases}$ 。

约束矩阵的建立。根据约束性质,对于 G 约束图 $G_i = (B_i, R_i)$, 可以构造一个矩阵,

$$G = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1N} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ R_{i1} & R_{i2} & \dots & R_{iN} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ R_{N1} & R_{N2} & \dots & R_{NN} \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中: N 为矩阵的阶数, 它与约束系统中实体的数量相等; R_{ij} 表示第 i 个待布局物体相对于第 j 个待布局物体的约束关系。目的是抽象出可以用计算机语言处理又符合工程实际的约束模型。

2.3 约束优先级

由于布局中约束的复杂性, 所以其处理是非常复杂的。约束的处理方法借鉴计算机的作业调度, 根据约

束的重要性、自由度和相应的可布局空间来确定优先级。约束表如表 1 所示。

表 1 约束表

Table 1 Constraint priority

序列	约束对象	约束类型	优先级	说明	序列	约束对象	约束类型	优先级	说明
0	0	1	1	点	6	0	7	4	在面 XZ
1	0	2	1	静态	7	0	8	4	在面 YZ
2	0	3	3	在线 Z 上	8	0	9	4	在面 XY
3	0	4	3	在线 Y 上	9	10	10	5	对称
4	0	5	3	在线 X 上	10	9	10	5	对称
5	0	6	2	距离近	11	1	11	6	距离远

3 基本布局算法

1) 布局容器的处理。

容器处理, 设立系统坐标系。根据要布局的物体个数、总的体积以及舱室参数计算出大概长度和半径, 并根据实际要求固定一个方向的参数。 $r = L_z/k$, 在本文中首先确定的是 Z 方向的长度 L_z 。根据中心线向外围渐渐扩大。布局容器几何简化如图 1 所示。

2) 约束处理。

如果存在约束, 按照上一节中的处理方法处理约束, 该布局容器在 Z 方向的一定范围是要求 $B_{i,Y} - L_{i,Y}/2 \geq 0$ 。所以布局中要根据约束矩阵将待布局物体布置到布局空间。

3) 无约束物体的分组分类。

在多次布局实验下, 得出了布局物体需要按照 $\sqrt{(L_{i,X})^2 + (L_{i,Y})^2}$ 大小进行排序。通过多次布局实验得到: 根据长宽的比例, 如果 $0.5 < L_{i,X}/L_{i,Y} < 2$, 不做处理; 否则, $\sqrt{(L_{i,X})^2 + (L_{i,Y})^2} \times \eta$, η 表示长宽比例不协调的系数, 一般取 1.1 ~ 1.4。

4) 布局物体初始化。

在布局环境中, 布局物体的初始位置为 $(0, 0, B_{i,Z} = -L_z/2 + L_{i,Z}/2)$ 。

$r = 0$ 。

5) 判断是否干涉。

判断条件与三维长方体布局中的判断条件相同, 如果干涉转 6), 否则转 7)。

6) 改变布局位置。

根据使得步长增量 $\Delta f = f_{n_{i+1}} - f_{n_i}$ 改变最小的原则进行。在本文算法中, $(\Delta\theta, \Delta r, \Delta z)$ 分别为周向角度、半径方向以及 Z 方向增加的步长。具体过程见图 3。

7) 判断布局完成与否。若是, 转 8); 否则, 转 4)。

8) 计算优化结果, 完成退出。

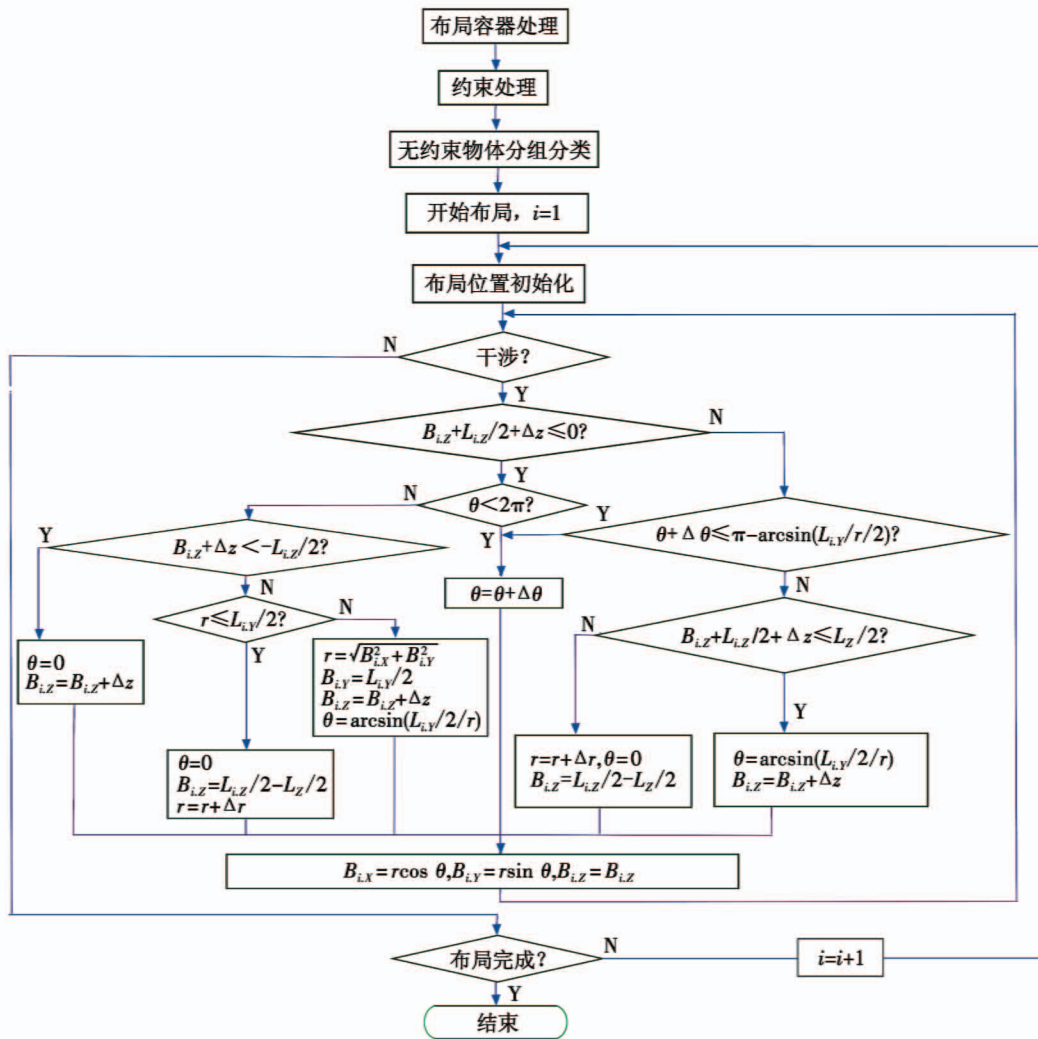


图3 布局算法流程图

Fig. 3 The flow chart of the layout algorithm

4 应用实例

为验证算法的可行性,以 Pro/e 2.0 和 VC ++ 6.0 为平台,开发自动布局的软件系统。对飞机设备舱室布局进行了 16 次实验,得到结果数据如表 2 所示。所有实例中,带有 10 个 5 种约束类型的布局物体,图 4 为布局个数为 40 的三维布局结果模型。

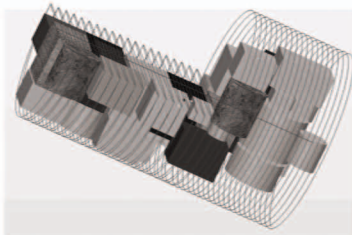


图4 三维布局结果模型(40个布局物体)

Fig. 4 The 3D layout model of 40 objects

表2 飞机设备舱布局统计结果

Table 2 The statistical results of aircraft layout

数目	时间/s	X 向重心	Y 向重心	Z 向重心	容积率
30	21.078	0.328	14.631	-52.284	0.689 9
40	57.969	8.461	13.391	-47.429	0.692 0
50	172.516	-2.290	19.945	-55.353	0.702 3
64	134.641	3.219	17.427	-39.359	0.727 7
67	232.844	3.929	20.072	-48.843	0.711 4
70	307.766	-0.171	16.339	-57.652	0.695 8
76	262.375	7.863	17.543	-62.681	0.723 9
80	231.703	3.790	19.430	-59.093	0.714 0
84	215.984	7.733	17.895	-52.185 3	0.701 7
88	523.266	3.990	20.960	-65.301 3	0.698 2
90	392.828	2.150	19.070	-52.925 3	0.686 4
91	515.297	2.511	19.898	-58.893 3	0.676 0
94	452.203	2.942	20.820	-59.416	0.694 8
97	495.422	5.029	15.982	-62.788	0.692 5
100	714.360	4.058	20.011	-67.746	0.700 4
110	814.953	2.885	19.065	-62.943	0.691 2

当优化步长为 $\Delta r = 3, \Delta \theta = 0.1, \Delta z = 3$ 时, 优化布局容积率基本处于 70% 左右, 因为是阶梯状, 所以 Z 方向的重心值绝对值比较大, 但是还比较稳定。国内外没有类似的研究结果可以比较, 但从统计结果来看, 布局算法稳定, 无论从布局容积率、重心变化和布局时间来看均远远优于手工布局。

5 结论

实现有约束处理的自动化布局设计, 主要是面向飞机早期的概念设计阶段, 面对的布局问题较抽象, 因此将模型简化为可以处理的三维布局问题。本文针对飞机设备舱三维布局设计, 利用约束物体对应布局空间大小、约束的重要性、约束处理的难度来建立约束的优先级, 控制布局的有序性, 在过程中可以保证大部分约束的实现, 通过分组分类的待布局物体预处理技术, 保证了有约束布局的重心、容积率和较高布局效率, 从而验证了约束模型和布局方法的有效性。

参考文献

- [1] 刘景发, 高泽旭, 龙羽正, 等. 求解带动不平衡约束的卫星舱布局问题的启发式算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(8): 1232-1239.
- [2] 崔宗泰, 徐止政, 滕弘飞, 等. 旋转多段舱组件布局优化方法[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(3): 705-713.
- [3] GRIGNON P M, FADEL G M. A GA based configuration design optimization method [J]. Journal of Mechanical Design, 2004, 126: 6-15.
- [4] 孙伟, 韩晓建. 基于模拟退火算法的布局优化技术研究[J]. 机械技术史及机械设计, 2008(00): 360-364.
- [5] 张妙. 求解卫星舱布局问题的分治混合算法[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2016.
- [6] 王远辉, 王秀坤, 滕弘飞. 对立扰动协同差分进化算法及其在卫星舱布局的应用[J]. 大连理工大学学报, 2010, 50(6): 931-936.
- [7] 何琨, 黄文奇. 求解长方体 Packing 问题的高效算法[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(s1): 7-10.
- [8] 王金敏, 王世宇, 王多, 等. 布局调度问题的聚合算法[J]. 天津大学学报, 2002, 35(4): 477-481.
- [9] 王征, 孙明鹏, 戴国忠, 等. 虚拟家居设计系统中基于约束的三维布局[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(30): 108-111.
- [10] 吴涛, 高福运, 白跃伟, 等. 用三维几何约束构建概念化设计阶段的三维布局[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, 15(7): 907-912.

(上接第 100 页)

长波标准镜头的设计与像质分析, 开展了光学系统设计及评估、弥散斑分析等关键参数分析, 结果表明设计满足指标要求。

参考文献

- [1] 罗金平, 王合龙, 刘欣, 等. 二次成像光学被动无热化设计[J]. 电光与控制, 2012, 19(4): 85-88.
- [2] 李林. 现代光学设计方法[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009: 235-241.
- [3] 陈建发, 王合龙, 刘欣. 中波红外光学系统光学被动无热化设计[J]. 电光与控制, 2013, 20(12): 88-91.
- [4] 汪京. 无热化设计的紧凑型长波折反式光学系统[J]. 电光与控制, 2013, 20(4): 60-62, 91.
- [5] 王学新, 焦明印. 红外光学系统无热化设计方法的研究[J]. 应用光学, 2009, 30(1): 129-133.
- [6] LI W H, LIU Z H, MU Y, et al. Modeling and research of a space-based spacecraft infrared detection system [J]. Applied Optics, 2017, 56(9): 2428-2433.
- [7] ZHANG W F, LIANG J, REN L Y. Real-time image haze removal using an aperture-division polarimetric camera [J]. Applied Optics, 2017, 56(4): 942-947.
- [8] YU W B, JIANG J, ZHANG G J. Multiexposure imaging and parameter optimization for intensified star trackers [J]. Applied Optics, 2016, 55(36): 10187-10197.
- [9] WERELEY S, ZHANG Y X, KHOR J W, et al. Single-acquisition wide-field superresolution for telescopes [J]. Applied Optics, 2016, 55(35): 10025-10029.
- [10] ZHENG B, WANG X D, HUANG J T. Selective visual attention based clutter metric with human visual system adaptability [J]. Applied Optics, 2016, 55(27): 7700-7706.