

DOI:10.16356/j.1005-2615.2021.04.012

## 冲压空气涡轮系统结构协同优化

夏天翔<sup>1,2</sup>, 卢岳良<sup>1,2</sup>, 柯兵<sup>1,2</sup>

(1. 航空工业南京机电液压工程研究中心能源传动部, 南京 211106;  
2. 航空机电系统综合航空科技重点实验室, 南京 211106)

**摘要:** 针对冲压空气涡轮系统, 首先分析了结构在贮存场景和工作场景下的载荷工况, 然后对各工况下的约束进行数学建模。基于敏感性分析方法发现, 冲压空气涡轮结构方案设计中的关键设计变量包括支撑臂、收放作动器、舱门连杆的内外径以及它们之间的连接点位置。之后, 建立了冲压空气涡轮系统结构的动态松弛协同优化模型。该优化模型中, 首先针对贮存场景和工作场景分别进行考虑多工况约束的结构优化, 然后在系统级借助动态松弛因子进行优化变量的协调。最终, 本文在 Isight 多学科设计优化软件中实现相关仿真分析、工具集成和优化求解。基于动态松弛的协同优化方法, 本文将冲压空气涡轮的结构重量优化至初始重量的 87%, 优化效果显著。

**关键词:** 冲压空气涡轮系统; 结构优化; 协同优化; 动态松弛; 多工况

**中图分类号:** V245      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2021)04-0583-08

## Collaborative Optimization of Ram Air Turbine System Structures

XIA Tianxiang<sup>1,2</sup>, LU Yueliang<sup>1,2</sup>, KE Bing<sup>1,2</sup>

(1. AVIC Nanjing Engineering Institute of Aircraft System, Nanjing 211106, China;

2. Aviation Science and Technology Key Laboratory of Aviation Mechanical and Electrical System, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** The load cases of ram air turbine (RAT) system are firstly analyzed aim at the storage scenario and utilization scenario. Then the mathematical models of the constraints under all the load cases are constructed. Based on these mathematical models, the structure optimization model of the ram air turbine system is established by using collaborative optimization method. In this optimization model, the multi-load-cases structure optimization is firstly carried out for the storage scenario and utilization scenario. Meanwhile, the optimized parameters are coordinated with aid of the dynamic relaxation factor. Finally, the integration of relative simulation analysis tools and the optimization are achieved in Isight multidisciplinary design optimization software. The optimization results show that the collaborative optimization method established in this paper can significantly reduce the weight of the ram air turbine system structures.

**Key words:** ram air turbine (RAT) system; structure optimization; collaborative optimization; dynamic relaxation; multi-load-cases

随着飞机“多电技术”的发展, 机上越来越多地使用电能作为主要能源系统<sup>[1-4]</sup>。冲压空气涡轮(Ram air turbine, RAT)系统作为一种机载应急能

源系统, 在飞机失去主、辅动力的紧急情况下, 能将气流的冲压能转变为电能和液压能, 维持飞机的可操控性。从用户角度出发, RAT作为飞机必须背

**基金项目:** 航空科学基金(20182809005)资助项目。

**收稿日期:** 2020-10-16; **修订日期:** 2021-05-16

**通信作者:** 夏天翔, 男, 博士, 高级工程师, E-mail: xiatx@neias.cn。

**引用格式:** 夏天翔, 卢岳良, 柯兵. 冲压空气涡轮系统结构协同优化[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(4): 583-590.  
XIA Tianxiang, LU Yueliang, KE Bing. Collaborative optimization of ram air turbine system structures[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(4): 583-590.

负的冗余设备应该在具备所需安全性、耐久性的同时具备最低的重量。因此,针对RAT开展结构优化设计技术研究具有重要的工程应用价值。

RAT平时贮存于RAT舱内并由舱门保护。当飞机在空中失去主、辅动力后,RAT由机体内释放以将冲压空气能转换为飞机能源。RAT在全生命周期内可以分为两类运行场景——贮存场景(RAT主要承受振动、过载、舱门气动力等载荷)和工作场景(RAT主要承受运动冲击、气动力、气弹振动、过载等载荷)。RAT在这两种运行场景下承受着不同的载荷工况。

目前,国内外学者已将结构优化设计广泛应用于工业制造领域<sup>[5-12]</sup>。这些结构优化设计方法中,适用于多工况约束的协同优化设计方法也有一些学者进行了工程应用:付雅婷等开展了多工况下的高速动车组运行速度控制优化<sup>[13]</sup>;陈宝等开展了面向多工况性能匹配的汽车悬架衬套多因素联合优化<sup>[14]</sup>;余知朴等研究了多工况下飞机货舱门开启功能的可靠性优化设计方法<sup>[15]</sup>;苏绍娟等开展了多工况应力约束下的船舶结构优化<sup>[16]</sup>;邹坤等开展了基于工况风险评估的叉车门架多工况拓扑优化<sup>[17]</sup>;钱杨等进行了基于分段动态松弛协同优化算法的船舶机舱结构优化设计<sup>[18]</sup>;高德峰等进行了基于协同优化自卸车卸料装置有限元优化分析<sup>[19]</sup>。

鉴于有关RAT的研究主要集中于性能分析领域<sup>[20-23]</sup>,尚未涉及结构优化,本文以RAT系统结构减重为研究目标,首先进行了RAT运行场景和典型载荷工况分析,然后基于刚体动力学、结构力学、仿真等方法建立各工况下设计变量和约束的数学模型并基于敏感度分析确定了关键设计变量。最终,本文建立了RAT结构的协同优化模型,并在此基础上基于Isight多学科设计优化软件对某型RAT系统进行了结构优化设计。

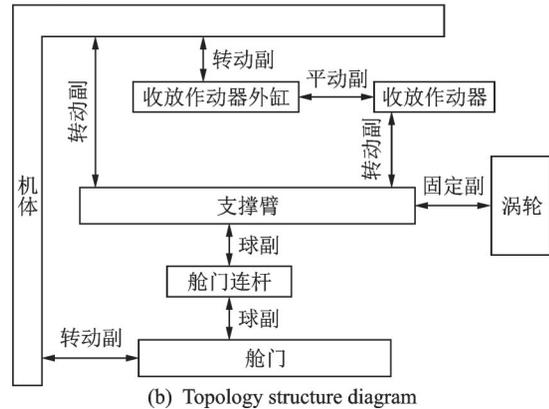
## 1 载荷工况与边界约束

### 1.1 系统组成

图1是典型RAT系统的实物图和拓扑结构图。RAT系统由支撑臂(含能量转换装置)、涡轮、收放作动器等组成。支撑臂和收放作动器与机体结构均采用转动副连接。收放作动器为一个液压缸,其内、外缸能够相关滑动并伸出,从而推动支撑臂展开。涡轮为风能提取部件,与支撑臂固定连接。支撑臂与RAT舱门由舱门连杆连接,舱门连杆两端为球副,能够保证支撑臂在放收过程中带动舱门完成打开和关闭的随动运动。



(a) Photograph of RAT



(b) Topology structure diagram

图1 RAT实物图和相应的拓扑结构图

Fig.1 Photograph and topology structure diagram of RAT

### 1.2 工况和约束分析

#### 1.2.1 贮存场景

贮存场景下,RAT不工作,随飞机日常飞行。此时,RAT的载荷工况主要为基础振动和静力:

(1) 基础振动工况。指机体传递给RAT的基础振动激励。为防涡轮振动过大导致叶片与舱门发生碰擦,在设计时通常会给出涡轮处的位移响应上限作为设计约束。

(2) 静力工况。包含由舱门连杆传递给RAT的舱门气动吸力和舱门过载力。由于相比于舱门,RAT自身的过载力分布不均且较小,因此本文忽略RAT自身的过载力。此工况下RAT结构需满足强度约束。

#### 1.2.2 工作场景

工作场景下,RAT首先完成释放(包括收放作动器伸长并推动支撑臂展开、舱门打开)。释放到位后,冲压空气驱动涡轮旋转并工作。此时RAT涡轮会受到一个向后的气动推力。此外,舱门所受气动力也由舱门连杆传递给RAT。需要指出的是,整个工作过程中(直到迫降前),RAT虽然也会承受过载和基础振动激励作用,但是这部分载荷与气动力相比可以忽略。综上,在工作场景下,RAT结构受到的载荷工况和相应约束如下:

(1) 展开工况。该工况下需要RAT满足展开角度和舱门打开角度的约束。

(2) 气弹振动工况。气动力与结构刚度耦合导

致的结构振动。RAT 在该工况下需满足涡轮处的转角位移约束。

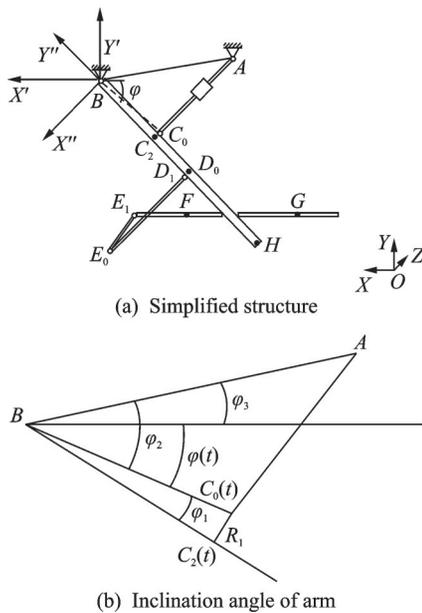
(3) 静力工况。RAT 结构在舱门和涡轮气动压力作用下需满足强度要求。

## 2 约束的数学建模

### 2.1 展开工况

RAT 展开过程类似于一种活塞连杆运动。根据图 1(b)的 RAT 拓扑结构图建立如图 2(a)所示的多体运动模型。该模型中,考虑了收放作动器与支撑臂的连接点、收放作动器与舱门连杆的连接点并不在支撑臂轴线的实际设计情况。

图 2(a)中,连杆  $AC_0$  是液压作动器,  $A$  点是作动器转动铰轴心,  $C_0$  点是作动器与支撑臂的转动铰, 过作动器  $AC_0$  作支撑臂的垂线, 垂足是  $C_2$  点; 连杆  $BH$  为支撑臂,  $B$  点是支撑臂与机体的转动铰;  $D_1E_0$  是舱门连杆, 支撑臂和舱门连杆的球铰是  $D_1$  点,  $D_0$  是  $D_1$  在支撑臂  $BH$  轴线上的垂足,  $E_0$  点是舱门连杆与舱门的球铰;  $FG$  是舱门转轴, 过球铰  $E_0$  作舱门转轴  $FG$  的垂线,  $E_1$  是垂足。由于机上结构的限制, 图 2(a)中的  $A$ 、 $B$ 、 $E_0$  点位置和支撑臂长度  $BH$  均为已知量。



(a) Simplified structure  
(b) Inclination angle of arm  
图 2 结构简化模型

Fig.2 Simplified structure model of RAT

在任意时刻  $t$ , 支撑臂转轴  $B$ 、收放作动器上转轴  $A$ 、收放作动器与支撑臂连接点  $C_0$  的位置如图 2(b)所示。此时, 收放作动器伸长了  $dL$ , 长度为  $AC_0 + dL(t)$ 。

对于图 2(b)的直角三角形  $BC_0(t)C_2(t)$ ,  $R_1$  是  $C_0(t)$  与支撑臂轴线的距离, 则  $BC_0(t)$  与  $BC_2(t)$  的夹角为

$$\varphi_1 = \arctan\left(\frac{R_1}{BC_2}\right) \quad (1)$$

对于  $\triangle ABC_0(t)$ ,  $AB$  与  $BC_0(t)$  的夹角  $\varphi_2$  随作动器  $AC_0$  的伸长发生变化, 由余弦定理得

$$\varphi_2(t) = \arccos\left(\frac{AB^2 + BC_0^2 - (AC_0 + dL)^2}{2 \cdot AB \cdot BC_0}\right) \quad (2)$$

此外,  $\varphi_3$  是  $AB$  与水平轴的夹角, 由  $A$ 、 $B$  两点的坐标确定。综上, 任意时刻支撑臂展开角  $\varphi$  为

$$\varphi(t) = \varphi_1 + \varphi_2(t) - \varphi_3 \quad (3)$$

于是,  $C_0$ 、 $D_1$ 、支撑臂端点  $H$  在任意时刻  $t$  时的坐标可以通过矩阵变换得到。以  $C_0$  为例, 其任意时刻  $t$  时的坐标为

$$C_0(t) = \begin{bmatrix} \cos\varphi(t) & -\sin\varphi(t) & 0 \\ \sin\varphi(t) & \cos\varphi(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \cos\theta_1 \\ -BC_2 \\ R_1 \sin\theta_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

对于舱门, 过球铰  $E_0$  作舱门转轴  $FG$  的垂线,  $E_1$  是垂足, 则  $E_1$ 、 $F$ 、 $G$ 、 $E_0$  四个点的位置满足以下关系

$$\begin{aligned} E_1F &= kFG \\ E_0E_1 &\perp FG \end{aligned} \quad (5)$$

由式(5)即可得到任意时刻  $E_0$  的坐标。进而任意时刻 RAT 舱门打开角度  $\psi$  (即  $E_1E_0$  与  $E_1E_0(t)$  之间的夹角) 可通过式(6)计算得到。

$$\psi = \arccos\left(\frac{E_1E_0 \cdot E_1E_0(t)}{|E_1E_0| |E_1E_0(t)|}\right) \quad (6)$$

### 2.2 静力工况

无论 RAT 处于贮存场景还是工作场景, 均可基于构件三维空间位置分析各部件受力。简化起见, 本文将舱门气动力、过载力都折算为绕舱门转轴的力矩  $M_{Door}$ 。于是, 舱门连杆的轴向力  $F_{E_0D_1}$  按式(7)得到。

$$\begin{aligned} M_{E_0D_1, E_1} &= E_1E_0 \times F_{E_0D_1} \\ M_{E_0D_1, E_1, GF} &= \frac{M_{E_0D_1, E_1} \cdot GF}{|GF|} \\ M_{E_0D_1, E_1, GF} &= M_{Door} \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $F_{E_0D_1}$  为舱门连杆的轴向力矢量, 方向由  $E_0$  指向  $D_1$ ;  $E_1E_0$  为由  $E_1$  指向  $E_0$  的方向向量,  $M_{E_0D_1, E_1}$  为舱门连杆的轴向力  $F_{E_0D_1}$  相对  $E$  点的点之矩;  $GF$  为舱门转轴方向向量;  $M_{E_0D_1, E_1, GF}$  为  $F_{E_0D_1}$  相对舱门转轴的力矩。类似地, 可以计算得到收放作动器的轴向力和支撑臂上的轴向力、弯矩、扭矩。

各部件在结构方案设计阶段通常基于材料力学公式来估算应力水平。因此, 本文将舱门连杆和收放作动器简化为圆环截面的二力杆以校核其正应力; 考虑到支撑臂同时承受轴向力、弯矩、扭矩的

作用,本文基于多型产品的工程经验将其简化为圆环截面,并校核其Mises等效应力。支撑臂的Mises等效应力最大截面出现在末端B处或与收放作动器连接的C<sub>2</sub>处。

### 2.3 基础振动工况

由于RAT系统在基础激励作用下的位移响应难以得到解析解,本文基于ANSYS Mechanical将整个结构简化为如图3所示的板杆单元。通过有限元分析,得到结构方案在基础激励作用下的涡轮部位位移响应。

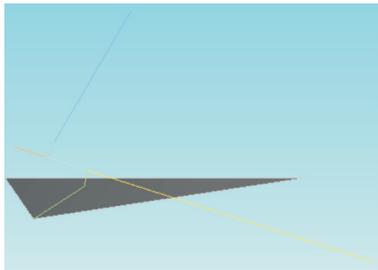


图3 板杆单元模型

Fig.3 Plate-bar finite element model of RAT

### 2.4 气弹振动工况

对于工作场景下的气弹振动激励,其原理如图4所示。在初始时刻,涡轮受到的气动力为

$$F_{\text{Turbine}} = \frac{1}{2} C_d \rho_{\text{air}} V^2 \pi R^2 \quad (8)$$

式中: $C_d$ 为推力系数,为与涡轮设计有关的常量; $\rho_{\text{air}}$ 为来流密度; $R$ 为涡轮半径,为与涡轮设计有关的常量; $V$ 为来流平行于涡轮轴线的速度。

RAT受到 $F_{\text{Turbine}}$ 作用后产生向后的变形(设偏角为 $\theta$ )。于是,来流平行于涡轮轴线的速度减小为 $V \cos \theta$ , $F_{\text{Turbine}}$ 相应地减小为 $F'_{\text{Turbine}}$ ,即

$$F'_{\text{Turbine}} = \frac{1}{2} C_d \rho_{\text{air}} V^2 \pi R^2 \cos^2 \theta \quad (9)$$

紧接着,RAT结构的变形会减轻,从而又使 $F'_{\text{Turbine}}$ 增加。这样的波动往复产生,导致RAT结构气弹振动。

综上,RAT结构气弹振动的动力学方程为

$$J\ddot{\theta} + C\dot{\theta} + K\theta = \frac{1}{2} C_d \rho_{\text{air}} V^2 \pi R^2 \cos^2 \theta \quad (10)$$

式中: $J$ 为RAT结构弯曲转动惯量,由三维模型测量得到; $C$ 为RAT弯曲阻尼,取工程经验值; $K$ 为RAT结构弯曲刚度,与 $BC_2$ 、 $R_1$ 、 $BD_0$ 、 $R_2$ 、 $\theta_1$ 、 $R_{AC_0\text{,out}}$ 、 $R_{AC_0\text{,in}}$ 、 $R_{BH\text{,out}}$ 、 $R_{BH\text{,in}}$ 、 $R_{E_0D_1\text{,out}}$ 、 $R_{E_0D_1\text{,in}}$ 等设计参数有关,本文通过ANSYS Workbench软件分析得到。该振动方程是一个非线性常微分方程,难以有解析解。本文借助Amesim软件进行数值求解。

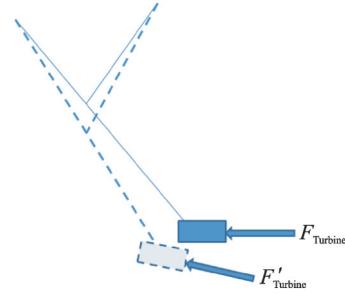


图4 气弹振动示意图

Fig.4 Diagram of aeroelastic vibration of RAT

## 3 优化模型

### 3.1 参数灵敏度分析

为了提高优化效率,快速找到对约束影响较大的设计变量,本文首先借助参数灵敏度分析进行优化参数筛选。某型RAT系统的结构设计变量初始值如表1所示。通过对表1中的设计初始值施加1%的扰动,观察相关约束的变化情况。

表1 设计变量初始值

Table 1 Initial values of design variables

设计变量	初始值	上限	下限
$BC_2/\text{mm}$	145	100	150
$R_1/\text{mm}$	70	60	80
$BD_0/\text{mm}$	320	270	330
$R_2/\text{mm}$	75	60	80
$\theta_1/(\text{°})$	45	0	90
$R_{AC_0\text{,out}}/\text{mm}$	25	15	25
$R_{AC_0\text{,in}}/\text{mm}$	10	10	15
$R_{BH\text{,out}}/\text{mm}$	40	30	40
$R_{BH\text{,in}}/\text{mm}$	20	20	30
$R_{E_0D_1\text{,out}}/\text{mm}$	10	8	12
$R_{E_0D_1\text{,in}}/\text{mm}$	6	4	8

表2是各设计变量对约束的灵敏度分析结果。表中: $\psi$ 为舱门转角, $\varphi$ 为支撑臂展开角, $\sigma_{E_0D_1}$ 为舱门连杆等效应力, $\sigma_{C_0A}$ 为收放作动器等效应力, $\sigma_{BH}$ 为支撑臂等效应力, $s_{H\text{,base}}$ 为基础激励下的涡轮位移响应, $\theta_{H\text{,air}}$ 为涡轮处的气弹振动转角。

从表2中可以发现, $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\theta_1$ 这3个变量对任意约束的敏感度均小于2%,因此在建立优化模型时忽略这3个设计变量。换句话说,本文将舱门连杆、收放作动器与支撑臂的连接点简化到支撑臂轴线上。

### 3.2 优化模型

协同优化方法(Collaborative optimization, CO)是针对航空器不同学科间组织和通讯困难问题而提出的一种两级多学科优化方法。CO法在系统级负责从全局考虑优化设计变量和各子系统

表 2 灵敏度分析结果  
Table 2 Results of sensitivity analysis

设计变量	约束							/%
	$\psi$	$\varphi$	$\sigma_{E_0D_1}$	$\sigma_{C_0A}$	$\sigma_{BH}$	$S_{H\_base}$	$\theta_{H\_air}$	
$BC_2$	-1.72	-2.39		-5.37	-1.51	0.004	-0.35	
$R_1$	-0.33	-0.46		0.56	0.16	0.001	-0.07	
$BD_0$	-4.15		8.31	10.25	3.88	-1.91	-1.39	
$R_2$	0.24		1.76	1.86	0.73	0.14	0.37	
$\theta_1$	-0.99		0.09	-0.09	-0.02	0.34	0.30	
$R_{AC_0.out}$				-57.19		-0.50	-0.44	
$R_{AC_0.in}$				48.11		0.20	0.13	
$R_{BH.out}$					-8.94	-1.44	-26.35	
$R_{BH.in}$					5.70	-2.06	10.94	
$R_{E_0D_1.out}$			-13.31			-0.01	-0.005	
$R_{E_0D_1.in}$			5.27			0.01	0.004	

间的耦合,并通过一致性约束协调各子系统设计之间的差异;在各个子系统层级,则分别独立优化相应的设计变量,使在满足子系统级约束条件下与系统级指定的全局设计变量之间的差异最小。

本文所研究的 RAT 结构在贮存场景和工作场景下分别处于回收、展开构型,结构差异较大,且两种场景下的约束条件也不同。与此同时,两种场景下的结构设计变量却又相同。因此,这类 RAT 结构优化问题非常适合采用 CO 法进行求解。

采用动态松弛 CO 法构建优化模型如下。

系统级优化模型

$$\begin{aligned} & \text{find } X \\ & \text{min } W \\ & \text{s.t. } \|X_1^{i-1} - X\|^2 \leq s_i \\ & \quad \|X_2^{i-1} - X\|^2 \leq s_i \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $X$ 为设计变量矩阵,包括支撑臂转轴  $B$  与收放作动器连接点  $C_2$  的距离  $BC_2$ 、支撑臂转轴  $B$  与舱门连杆连接点  $D_0$  的距离  $BD_0$ 、收放作动器外径  $R_{AC_0.out}$ 、收放作动器内径  $R_{AC_0.in}$ 、支撑臂外径  $R_{BH.out}$ 、支撑臂内径  $R_{BH.in}$ 、舱门连杆外径  $R_{E_0D_1.out}$ 、舱门连杆内径  $R_{E_0D_1.in}$ ;优化目标  $W$  为结构重量,为设计变量的经验函数,初始值经归一化后为 1;角标  $i$  表示第  $i$  轮系统级协调; $X_1^{i-1}$ 、 $X_2^{i-1}$  表示第  $i-1$  轮的子系统级优化结果( $i=0$  表示采用初始值); $s_i$  为第  $i$  轮系统协调时的动态松弛因子,定义为

$$s_i = (\lambda \Delta_i)^2 \quad (12)$$

动态松弛因子能够动态调整系统级优化变量与子系统级优化结果的差异,保证系统级协调优化的速度和收敛性。式(12)中, $\lambda$  本文取 0.7, $\Delta_i$  为第  $i$  轮系统协调时的子系统间不一致信息,定义为

$$\Delta_i = \|X_1^{i-1} - X_2^{i-1}\| \quad (13)$$

贮存场景子系统级优化模型

$$\begin{aligned} & \text{find } X_1 \\ & \text{min } \|X_1 - X^{i-1}\| \\ & \text{s.t. } \sigma_{E_0D_1} \leq [\sigma_{E_0D_1}] \\ & \quad \sigma_{C_0A} \leq [\sigma_{C_0A}] \\ & \quad \sigma_{BH} \leq [\sigma_{BH}] \\ & \quad S_{H\_base} \leq S_{H\_base\_max} \end{aligned} \quad (14)$$

式中: $X_1$ 为贮存场景的子系统级优化变量矩阵;约束  $\sigma_{E_0D_1}$  为舱门连杆等效应力,不大于 600 MPa;约束  $\sigma_{C_0A}$  为收放作动器等效应力,不大于 600 MPa;约束  $\sigma_{BH}$  为支撑臂等效应力最大值,不大于 400 MPa;约束  $S_{H\_base}$  为基础振动激励下的支撑臂端部  $H$  点位移量,不大于 2.5 mm。 $X^{i-1}$  为前一轮系统协调后的优化变量值,该子系统级优化目标是使  $X_1$  与  $X^{i-1}$  的距离最小。

工作场景子系统级优化模型

$$\begin{aligned} & \text{find } X_2 \\ & \text{min } \|X_2 - X^{i-1}\| \\ & \text{s.t. } \psi \geq \psi_{min} \\ & \quad \varphi \geq \varphi_{min} \\ & \quad \sigma_{E_0D_1} \leq [\sigma_{E_0D_1}] \\ & \quad \sigma_{C_0A} \leq [\sigma_{C_0A}] \\ & \quad \sigma_{BH} \leq [\sigma_{BH}] \\ & \quad \theta_{H\_air} \leq \theta_{H\_air\_max} \end{aligned} \quad (15)$$

式中: $X_2$ 为工作场景的子系统级优化变量矩阵;约束  $\psi$  为舱门展开角度,不小于  $110^\circ$ ;约束  $\varphi$  为支撑臂展开角度,不小于  $85^\circ$ ;约束  $\sigma_{E_0D_1}$  为舱门连杆等效应力,不大于 600 MPa;约束  $\sigma_{C_0A}$  为收放作动器等效应力,不大于 600 MPa;约束  $\sigma_{BH}$  为支撑臂等效应力最大值,不大于 400 MPa;约束  $\theta_{H\_air}$  为气弹振动下的涡轮处角位移,不大于  $8^\circ$ 。与贮存场景类似,

本子系统级优化目标是使  $X_2$  与  $X^{i-1}$  的距离最小。

### 3.3 优化结果

本文采用多学科优化软件 Isight 集成 Matlab、Amesim、ANSYS Workbench 搭建优化流程如图 5 所示。在 Matlab 中计算舱门展开角、支撑臂展开角、贮存和工作场景下的部件位置和强度；在 AN-

SYS Workbench 中基于 Matlab 计算得到各部件位置建立有限元模型,计算贮存场景中基础振动下的端部振动位移和展开后的结构弯曲刚度;在 Amesim 中基于结构弯曲刚度进行工作场景中气弹振动工况下的涡轮转角计算。优化目标  $W$  为 RAT 结构重量,为设计变量的经验函数。

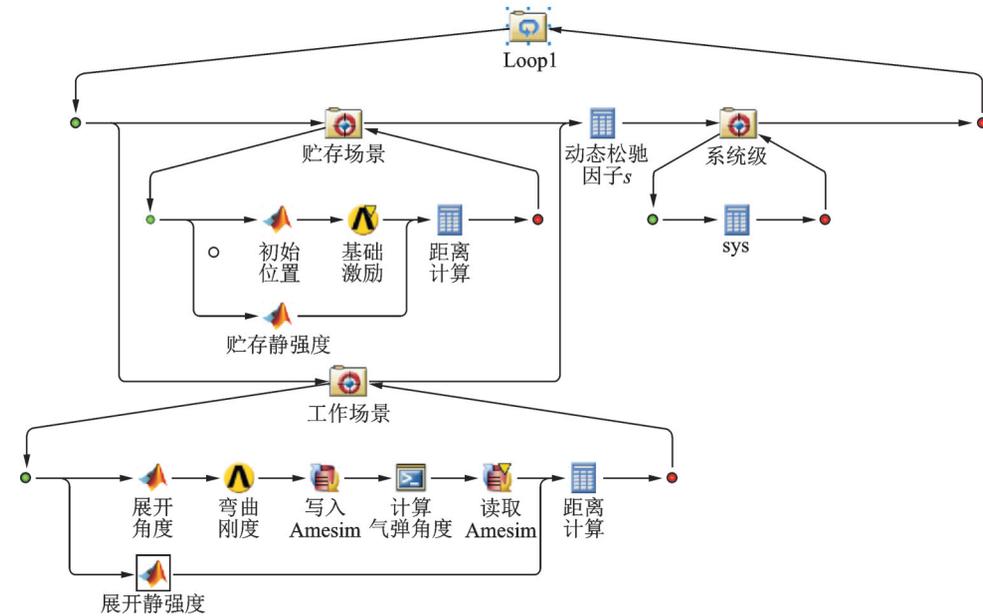


图5 Isight 优化流程图

Fig.5 Flow chart of Isight

经计算,优化结果如表 3 所示。可以发现,基于动态松弛的协同优化算法将 RAT 系统的结构重量优化至初始重量的 87%,相对模型初始值减小 13%。该组优化结果在系统级、贮存场景、工作场景优化模型中能够同时满足约束条件。

表 3 优化结果

Table 3 Optimization results

设计变量	结果	优化目标和约束	结果
$BC_2/\text{mm}$	134.28	$W/\%$	87
$BD_0/\text{mm}$	304.14	$\psi/(\circ)$	112.13
$R_{AC_0\_out}/\text{mm}$	19.24	$\varphi/(\circ)$	85.04
$R_{AC_0\_in}/\text{mm}$	17.79	$\sigma_{E_0D_1}/\text{MPa}$	597.11
$R_{BH\_out}/\text{mm}$	37.57	$\sigma_{C_0A}/\text{MPa}$	592.54
$R_{BH\_in}/\text{mm}$	27.89	$\sigma_{BH}/\text{MPa}$	399.10
$R_{E_0D_1\_out}/\text{mm}$	9.17	$s_{H\_base}/\text{mm}$	2.45
$R_{E_0D_1\_in}/\text{mm}$	6.31	$\theta_{H\_air}/(\circ)$	7.98

## 4 结 论

本文针对 RAT 系统进行了结构载荷分析和约束建模,基于协同优化方法建立了结构多工况优化模型并进行了优化算例求解。本文主要结论如下:

(1) RAT 系统在贮存场景下主要承受基础振动和舱门气动吸力的作用;在工作场景下主要承受

涡轮气动推力和舱门气动力的作用。RAT 系统在工作场景下需要考虑气弹振动约束和展开位移约束。相关强度、位移、气弹约束可以借助刚体动力学、结构力学、仿真等方法建立数学模型。

(2) 通过敏感性分析可以识别 RAT 结构方案设计中的关键设计变量为支撑臂、收放作动器、舱门连杆的内外径以及它们之间的连接点位置。

(3) 基于动态松弛 CO 法,可以建立考虑多场景、多约束的 RAT 结构优化模型。该优化模型通过约束不同场景间的不一致信息,最终得到全局最优设计。针对某型 RAT 系统,本文基于该优化模型将结构重量优化至初始重量的 87%,优化效果显著。

### 参考文献:

[1] 李永锋. 宽体客机飞控电作动系统设计[J]. 航空学报, 2017, 38(S1): 721531.  
LI Yongfeng. Electrically powered actuation system design for long range wide body commercial aircraft [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(S1): 721531.

[2] 孔祥浩,张卓然,陆嘉伟,等. 分布式电推进飞机电力系统研究综述[J]. 航空学报, 2018, 39(1): 46-62.

- KONG Xianghao, ZHANG Zhuoran, LU Jiawei, et al. Review of electric power system of distributed electric propulsion aircraft[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2018, 39(1): 46-62.
- [3] 王莉,戴泽华,杨善水,等. 电气化飞机电力系统智能化设计研究综述[J]. *航空学报*, 2018, 39(2): 522405.
- WANG Li, DAI Zehua, YANG Shanshui, et al. Review of intelligent design of electrified aircraft power systems[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2018, 39(2): 522405.
- [4] MARE J C, FU J. Review on signal-by-wire and power-by-wire actuation for more electric aircraft[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2017, 30(3): 857-870.
- [5] 褚双磊,李佳妮,魏志强,等. 基于运营要求的民用飞机概念设计参数优化[J]. *南京航空航天大学学报*, 2018, 50(6): 112-119.
- CHU Shuanglei, LI Jiani, WEI Zhiqiang, et al. Optimization of conceptual design parameters of civil aircraft based on operation requirements[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2018, 50(6): 112-119.
- [6] 解望,吴裕平,陈笑天. 共轴刚性旋翼桨毂减阻优化设计方法[J]. *南京航空航天大学学报*, 2019, 51(2): 220-225.
- XIE Wang, WU Yuping, CHEN Xiaotian. Optimal design method for drag reduction of coaxial rigid rotor hub[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2019, 51(2): 220-225.
- [7] YANG Yuan, WANG Zhongqi, YANG Bo. Topological optimization method for aeronautical thin-walled component fixture locating layout[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2017, 34(4): 405-412.
- [8] 付志方,王春洁. 载荷不确定的周期性结构稳健拓扑优化[J]. *北京航空航天大学学报*, 2017, 43(4): 747-753.
- FU Zhifang, WANG Chunjie. Robust topology optimization of periodic structures under uncertain loading[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2017, 43(4): 747-753.
- [9] 岳会军,张尧,李洪彪,等. 变速器齿轮振动机理及修形减振降噪方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2017, 43(10): 2003-2010.
- YUE Huijun, ZHANG Yao, LI Hongbiao, et al. Transmission gear vibration mechanism and modification method for vibration and noise reduction[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2017, 43(10): 2003-2010.
- [10] CHAI Xiao, YU Xiongqing, WANG Yuyu. Multi-point optimization on fuel efficiency in conceptual design of wide-body aircraft[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2018, 31(1): 99-106.
- [11] SUO Xinshi, YU Xiongqing, LI Hongshuang. Subset simulation for multi-objective optimization[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2017, 44(1): 425-445.
- [12] CHAI Xiao, YU Xiongqing, WANG Yuyu. Tradeoff study between cost and environmental impact of aircraft using simultaneous optimization of airframe and engine cycle[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2017(1): 1-10.
- [13] 付雅婷,杨辉. 基于多工况 ANFIS 模型的高速动车组运行速度控制[J]. *铁道学报*, 2019, 41(4): 33-40.
- FU Yating, YANG Hui. Speed control of high-speed electric multiple unit using a multiple operating condition ANFIS model[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2019, 41(4): 33-40.
- [14] 陈宝,张瑞,付江华,等. 面向多工况性能匹配的汽车悬架衬套多因素联合优化[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2019, 33(5): 17-26.
- CHEN Bao, ZHANG Rui, FU Jianghua, et al. Multi-factor optimization of suspension bushings for multi-working condition performance matching[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2019, 33(5): 17-26.
- [15] 余知朴,岳珠峰,刘伟. 多工况飞机货舱门开启功能的可靠性优化设计[J]. *机械设计与制造*, 2019, 38(6): 100-103.
- YU Zhipu, YUE Zhufeng, LIU Wei. The reliability optimization design for the open function of cabin door with multiple working condition[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2019, 38(6): 100-103.
- [16] 苏绍娟,张祥,王天霖,等. 多工况应力约束下多用途船货舱结构优化[J]. *船海工程*, 2020, 49(1): 52-60.
- SU Shaojuan, ZHANG Xiang, WANG Tianlin, et al. Optimization of cargo hold structure of a multipurpose ship under multiple load condition stress constraints[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2020, 49(1): 52-60.
- [17] 邹坤,侯亮,卜祥建,等. 基于工况风险评估的叉车门架多工况拓扑优化[J]. *中国机械工程*, 2019, 30(5): 568-577.
- ZOU Kun, HOU Liang, BU Xiangjian, et al. Multi-working condition topology optimization of forklift door frames based on working condition risk assessments[J]. *China Mechanical Engineering*, 2019, 30(5): 568-577.
- [18] 钱杨,王德禹. 基于分段动态松弛协同优化算法的船舶机舱结构优化设计[J]. *中国舰船研究*, 2016, 11(6): 40-46.
- QIAN Yang, WANG Deyu. Optimization design of

- ship engine room structures based on sectionalized dynamic relaxation collaborative optimization method [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2016, 11(6): 40-46.
- [19] 高德峰, 马志国. 基于协同优化自卸车卸料装置有限元优化分析[J]. 机械设计与制造, 2019, 40(6): 28-32.
- GAO Defeng, MA Zhiguo. Finite element optimal analysis of discharging assembly of dump truck based on collaborative optimization[J]. Machinery Design & Manufacture, 2019, 40(6): 28-32.
- [20] 李兴利, 侯瑞, 周晓春. 冲压空气涡轮舱门开缝问题研究[J]. 航空科学技术, 2015, 26(12): 16-19.
- LI Xingli, HOU Rui, ZHOU Xiaochun. Research on clearance of RAT cabin door[J]. Aeronautical Science and Technology, 2015, 26(12): 16-19.
- [21] 王永鑫, 崔宇. 冲压空气涡轮在民用涡桨飞机中的应用[J]. 航空制造技术, 2014, 14: 86-88.
- WANG Yongxin, CUI Yu. Application of ram air turbine in civil turbo-prop aircraft[J]. Journal of Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 14: 86-88.
- [22] 刘思永, 方祥军, 王屏. 可调桨距冲压空气涡轮气动特性实验与数值分析[J]. 航空动力学报, 2003(5): 587-592.
- LIU Siyong, FANG Xiangjun, WANG Ping. The aerodynamic characteristic experiment and numerical analysis of ram air turbine with auto coarse pitch[J]. Journal of Aerospace Power, 2003(5): 587-592.
- [23] 夏天翔, 卢岳良, 柯兵. 飞机冲压空气涡轮系统的动态特性分析[J]. 航空学报, 2020, 41(3): 423242.
- XIA Tianxiang, LU Yueliang, KE Bing. Analysis of the dynamic behavior of the aircraft ram air turbine system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(3): 423242.

(编辑:夏道家)