

文章编号: 100026893(2005)062071205

舰载直升机系留座的布置优化

李 书, 何忠桓, 徐丽娜

(北京航空航天大学 飞机设计所, 北京 100083)

Optimization Design of the Mooring Base of the Ship-based Helicopter

LI Shu, HE Zhonghuan, XU Lina

(Institute of Aircraft Design, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘 要: 本文根据舰载直升机系留索的受力特点, 推导出系留索的张力计算表达式, 利用遗传算法对系留点的位置进行优化, 得到了各海况下系留点的优化布局形式和系留索的张力值, 最后对得到的结果进行综合分析比较, 确定了最佳的系留座布局形式。

关键词: 舰载直升机; 系留; 遗传算法; 优化; 张力

中图分类号: V275+.1 **文献标识码:** A

Abstract: The ship-based helicopters are in complicated circumstances because of winds and waves. In this paper, the movements of the ship on the sea and the external loads on the helicopter on a ship are analyzed. The helicopter and the deck of the ship are treated as rigid bodies. Mooring the helicopter is realized usually by using cables. The cable is considered as a flexible element, and can be only subjected to tension. The forces of the cables are calculated by using two different methods. The expressions of the mooring cable tension calculation are derived. The locations of the mooring points are optimized by the genetic algorithm. Based upon the mathematic model and the genetic algorithm feature, the operator routine is designed. The programming language of MATLAB is applied the program design. According to the characteristics of the mooring cable, some added constraint conditions are taken into account for optimization. The optimum layout and the tension forces in the mooring cables are obtained for different sea conditions. Finally, the optimization results are found after making general comparison and analysis.

Key words: carrier-based helicopter; mooring; genetic algorithm; optimization; tension

当舰船在海面上航行或者静止停留时, 在波浪及海风的作用下, 舰船将会处在不断的运动之中。为了使直升机能够相对比较平稳的停留在舰船之上, 就必须给直升机配备相应的系留装置。特别是在高海况下, 直升机机体将会承受各个方向的载荷, 并且载荷较大, 机体结构及系留索具是否具有足够的承载能力, 就显得异常重要。如果不满足各自的强度要求, 系留设备、直升机机体等将会受到破坏。

为保证直升机在舰船上系留时的平稳性、安全性及机身结构本身强度要求, 需要对直升机的系留状况进行计算分析, 得到舰载直升机在外载荷作用下的各个系留点以及系留索的受力。在系留计算的基础上对系留座进行优化布置, 使直升机在舰船上系留时机体和系留索具等受力合理。

系留常用的系留载荷计算方法主要有矩阵力

法和位移法^[1], 但这两种方法在应用上较繁琐, 且不利于生成计算机程序来进行计算。1996年李进军等人^[2,3]采用能量法进行了这方面的计算研究, 这种方法比较方便于使用计算程序来实现, 基本上可以解决舰载直升机的系留载荷计算问题, 得到的结果也较为满意。

本文研究了舰载直升机系留载荷的计算和系留座的优化布置问题, 建立了张力的计算模型, 针对系留座和系留点不在同一高度这类边界条件, 推导出系留索张力计算表达式。通过分析为系留座合理布置提供依据, 并在得到的系留座布置方案前提下, 计算舰载直升机在此系留状态时各根系留索承受的张力。采用遗传算法进行优化时, 设计遗传算子考虑了系留索实际受力特点。

1 系留载荷计算

(1) 系留外载荷分析

¹ 系留状态 在系留情况下, 舰船运动引起的惯性载荷、机身风载和直升机重力等载荷, 计算

时都将其简化到直升机的重心 C 上,如图 1 所示。

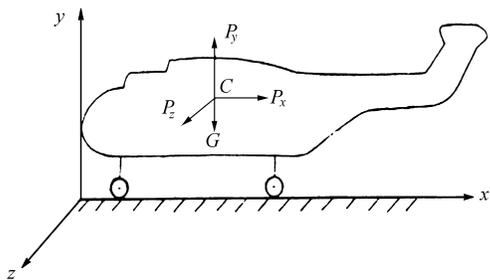


图 1 坐标系及受力简图

Fig 1 Coordinate system and force directions

一般来说,直升机机身、系留索等构件的变形均能对力的大小和分布均产生影响,但实际上往往是系留索等构件的变形较大,而直升机机身的变形相对很小。因此,当使用计算方法来求解时,可以把直升机机身作为刚体来进行处理。

并且直升机机轮不得承受向下的反作用力,系留索不能承受压力作用。

系留外载荷 直升机在舰船甲板上系留时,舰船的运动情况对直升机的受力影响较大,需要对舰船运动产生的惯性载荷和风载等系留外载荷一一进行分析计算。

初始载荷 确定初始载荷应考虑直升机的自重和系留索的预紧力,对于系留索而言需要考虑有无预紧力(只考虑预紧力为零而不松开的临界状态)两种情况。在本文分析系留索张力时,为了使系留索的形状确定对系留索均施加了一定的预紧力。

舰船运动引起的惯性载荷 舰船的运动包括横摇、纵摇、升沉和前进(本文称作海况 \tilde{N} 、 $\tilde{\theta}$ 、 $\tilde{\phi}$ 、 $\tilde{\psi}$),由舰船的运动引起的作用在直升机重心处的惯性载荷可由文献[1]确定

风载 由风载的作用而产生的载荷,可从下式^[1]计算得出

$$Q = 1676S(V/100)^2 \quad (1)$$

式中: Q 为作用于面积 S 的形心并平行于风向的风载合力,单位: N; S 为直升机投影在垂直于风向的平面上的面积,单位: m^2 ; V 为风速(节)。

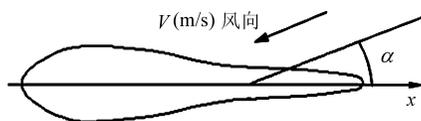


图 2 确定风载简图

Fig. 2 Wind force sketch

(2) 系留索张力计算

发生移动前后的坐标关系 当外载荷足够大时,直升机将会相对于舰船甲板产生一个微小的刚体位移。因舰船甲板的刚度较大,曲率较小,故此位移可视为仅含 u, v 和 H 3 个自由度的平面刚体移动。其中 u 和 v 分别是直升机机体沿 H_x 和 H_z 轴方向的平移量, H 为机体绕轴的转动角度,如图 3 所示。

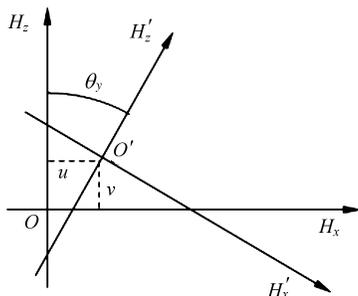


图 3 直升机的刚体位移图

Fig 3 Rigid body displacements of helicopter

设 H_x, H_y, H_z 和 H_{cx}, H_{cy}, H_{cz} 分别为机体发生刚体位移前后的坐标系,则发生刚体位移前后的坐标变换关系为

$$\begin{Bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{Bmatrix} = D \# \begin{Bmatrix} H_{cx} \\ H_{cy} \\ H_{cz} \end{Bmatrix} + C \quad (2)$$

令

$$D = \begin{Bmatrix} \cos H & 0 & \sin H \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin H & 0 & \cos H \end{Bmatrix}, C = \begin{Bmatrix} u \\ 0 \\ v \end{Bmatrix}$$

机体上任意一点因机体发生刚体位移后的位置变化量(在 H_x, H_y, H_z 坐标系中)

$$\begin{Bmatrix} \$X_i \\ \$Y_i \\ \$Z_i \end{Bmatrix} = (D - E) \# \begin{Bmatrix} H_{cx_i} \\ H_{cy_i} \\ H_{cz_i} \end{Bmatrix} + C \quad (3)$$

式中: E 为 3×3 的单位矩阵。

铅直力作用下系留索的张力计算模型^[4] 一根等截面系留索,若索的两端均固定,沿索长作用有铅直向下的分布载荷,张紧的索将只受张力作用,而不会出现松软情况,但是它具有初始张力。索的自重包含在铅直分布载荷 q 中,外作用力与索曲线同在一个铅直面内。

索只能受拉,因此横截面上的内力仅有沿轴线切向的拉力,即张力。因索的形状及两端的张力均未知,故无法由截面法直接来求得索张力,需要建立基本平衡方程求解。在索中截取微段,其受力情况如图 4 所示。

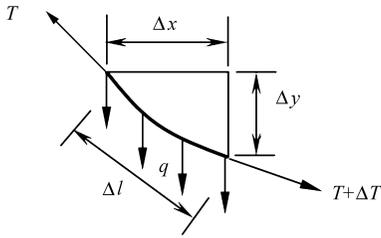


图 4 系留索微段受力示意图

Fig 4 Forces on infinitesimal element of cable

图中: T 为系留索张力; ΔT 为由于截面位置改变而引起的张力变化量; Δl , Δx , Δy 分别为索微段弧长及其在水平与铅直方向的投影。根据该段索在水平与铅直方向的平衡条件

$$\sum X = \Delta T_x = 0 \tag{4}$$

$$\sum Y = \Delta T_y + q\Delta l = 0$$

可得平衡方程

$$\frac{dT_x}{dl} = 0, \quad \frac{dT_y}{dl} = -q \tag{5}$$

式中: T_x 和 T_y 分别为系留索张力 T 在 x , y 方向的分量; ΔT_x 和 ΔT_y 为沿长度方向的改变量。由积分学原理: 根据式(5)的第 1 个方程可得知 T_x 为一常量, 即索的各横截面的张力可以是变化的, 但其水平分量却是恒定不变(包括两端固定处)。

将式(5)化成关于铅直位移 y 的二阶微分方程。由于系留索一端与机身相连, 另一端与系留座相连, 相应的边界条件为

$$\left. \begin{array}{l} \text{机身上: } y = H_i \\ \text{系留座上: } y = 0 \end{array} \right\} \tag{7}$$

式中: H_i 表示某个系留点据甲板的高度。

将系留索横截面的水平坐标 x 作为基本变量, 水平分量 T_x , 而 $dl^2 = dx^2 + dy^2$, 可得一个关于系留索铅直位移 $y(x)$ 的二阶非线性常微分方程, 如下式

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{q}{T_x} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \tag{8}$$

其通解为

$$y = -\frac{T_x}{q} \operatorname{sh} \frac{q}{T_x} (x + C_1) + C_2 \tag{9}$$

式中: sh 为双曲正弦函数; 常数 C_1 与 C_2 可通过两端边界条件来确定。

于是可得式(9)关于边界条件式(7)的解析解为

$$W_1 = e^{q/T_x}, W_2 = W_1(W_1 - 1)$$

$$W = 2W_1 H_i \frac{q}{T_x} + 2 \left[W_1^2 H_i^2 \left(\frac{q}{T_x} \right)^2 + W_1 - 2W_1^2 + W_1^3 \right]^{1/2}$$

$$y = -\frac{T_x}{q} \left\{ \operatorname{ch} \left[\frac{q}{T_x} x + \ln \left(\frac{W}{2b} \right) \right] - \frac{1 - W_1^2}{aW} + \frac{W^2 H_i}{b} \right\} \tag{10}$$

式中: ch 为双曲余弦函数。式(10)确定了系留索的形状, 进而可得到系留索的张力为

$$T = T_x \frac{dl}{dx} = T_x \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} = T_x \left[1 + \operatorname{sh}^2 \left[\frac{q}{T_x} x + \ln \frac{W}{2b} \right] \right]^{1/2} \tag{11}$$

3 基于遗传算法^[5,6]对系留点布置进行优化

(1) 优化设计的数学模型 针对本文所研究的直升机在舰船甲板上的系留问题, 通过综合分析考虑建立优化设计的数学模型如下。

目标函数

$$T_{\max} = T_x \left[1 + \operatorname{sh}^2 \left[\frac{q}{T_x} x + \ln \frac{W}{2b} \right] \right]^{1/2} \quad y \min \tag{12}$$

约束条件: $1 T_{\max} < T_{\text{允许}}$; $m F_i < F_{i\text{允许}}$; $n L_i < L_{\text{最大}}$; o 舰甲板系留点坐标必须在指定的系留区域范围内。

上述目标函数和约束条件中的符号意义: T_{\max} 为所有系留所中张力最大者; $T_{\text{允许}}$ 为系留索的最大允许张力; F_i 为直升机上系留点 i 的受力; $F_{i\text{允许}}$ 为直升机上系留点 i 处的最大允许受力; L_i 为系留索 i 的长度; $L_{\text{最大}}$ 为系留索 i 的最大允许长度。

(2) 确定编码方法 直升机的系留点均位于 XOZ 平面内, 具有两个坐标值 x 和 z , 即有两个决策变量。 x 和 z 的精度均取为 01 01, x 方向是从离散点 - 51 00 m 处到离散点 151 00 m 处 (z 方向从离散点 - 61 00 m 处到离散点 61 00 m 处), 分别依次对应于从 0000000000 (0) 到 1111111111 (2048) 之间的二进制编码。将分别表示 x 和 z 的两个 11 位长的二进制串连接在一起, 组成一个 22 位长的二进制编码串, 构成了优化问题的染色体编码。

$$X: \frac{00101101110 \quad 00101100110}{x_i \quad z_i}$$

上式就表示一个个体的基因型, 其中前 11 位表示变量 x , 后 11 位表示变量 z 。

(3) 确定解码方法 在染色体的二进制编码

串中一个个体有两个决策变量组成,故解码时需要先将22位长的二进制编码串切断为两个11位长的二进制编码串,然后分别将它们解码成对应的十进制整数代码xc和zc,依据个体编码方法和对定义域的离散化方法可知,将代码xc(或zc)转换为变量x(或z)的解码公式为

$$x = 20100 @ \frac{xc}{2047} - 5100 \quad (13)$$

(4) 个体适应度评价 目标函数为在每一种工况下各根系留索中所承受的张力最大者在不同布置形式下能够取值最小,即为求目标函数最小值问题。个体适应度函数f(X)为

$$f(X) = \begin{cases} C_{max} - T(X_i) & \text{if } 0 \leq T(X_i) < C_{max} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

式中:取 $C_{max} = T_{max}$,即预先指定的一个较大的数在本文中取为系留索的最大允许张力值; $T(X_i)$ 为编号为i的系留索的张力值。

由于在实际应用中,系留索只能承受拉应力而不能承受压应力,故系留索张力只能取正值,若在计算中出现 $T(X_i) < 0$ 的情况,则证明此时在直升机机体位移变化量为 $\{X_i, Y_i, Z_i\}$ 时,第i根系留索已经处于松弛状态,故此时该系留索张力应取 $T(X_i) = 0$ 。

(5) 选择算子 由于系留点分布在直升机的两侧,如果群体中的个体仍然按照随机的方式配对组成个体组,那么就会按照一定的几率将机身一侧的个体与另一侧的个体配成1个个体组,这样交叉后新个体就不一定仍是分布在机体不同侧的,从而产生混乱。故在交叉之前配对中附加一定的限制条件,避免这种情况的发生。这种限制是将系留点按其所在机身不同侧分为2组,称为2个小群体,先让每个小群体中的个体在各自的群体内按照随机的概率进行配对,然后再按随机概率进行交叉。这样虽然对交叉运算进行了一定的限制,但却是符合所研究问题的实际情况的,并且有效的避免了交叉过程中所产生的交叉结果混乱问题。

(6) 变异算子 以随机概率来进行变异操作,也会存在机身一侧的系留点变异后成为机身另一侧系留点的情况。这样的变异情况出现的概率虽然在整个变异过程中看来并不大,但它对整个遗传搜索过程来说却是有害的,使得整个种群产生的可行解与实际情况不符,故尽量避免这种情形的出现。在子个体变异后,对所得到的新个体进行了解码校对,如果出现上述情况应及早淘汰,以免影响

后面种群个体的选择、交叉、变异等运算。

4 舰载直升机系留点布置优化

系留直升机机身上系留点的位置如图5所示(系留点对称的分布在机身两侧);系留模型如图6所示。

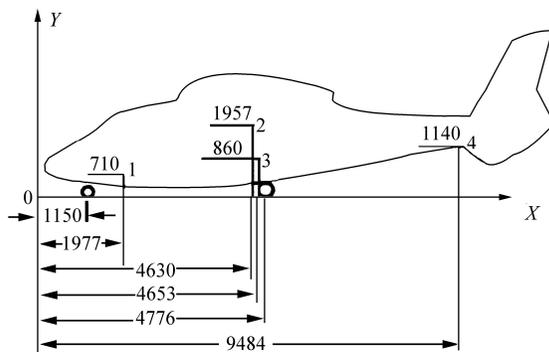


图5 直升机机身系留点位置示意图

Fig 5 Locations of the mooring points on fuselage

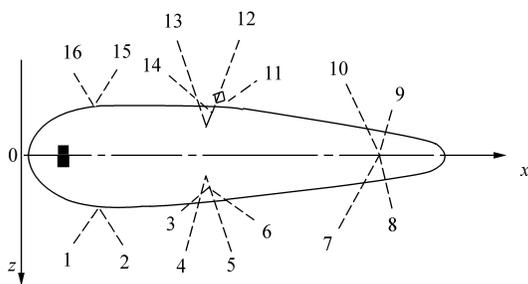


图6 系留模型示意图

Fig 6 The mooring model

舰体运动的加速度 $a_x = 0.068g$, $a_y = 0.400g$, $a_z = 0.107g$; 风速为 20.8 m/s , 与Z轴夹角 $\alpha = 0^\circ$; 舰船横摇角 $\leq 18^\circ$, 纵摇角 $H = 4^\circ$; 各系留索的预紧力 $T_0 = 0.5 \text{ kN}$ 。

综合以上计算结果,可得到满足海况 \tilde{N} 、 $\tilde{\theta}$ 、 $\tilde{\phi}$ 、 $\tilde{\psi}$ 的布局形式如图7所示:

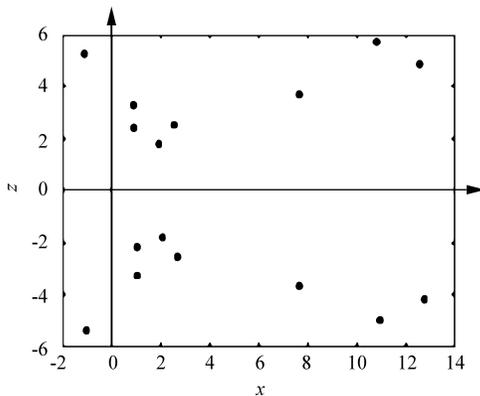


图7 系留点位置图

Fig 7 Locations of the mooring points on deck

5 结论

对直升机在舰船上系留的受力情况做了一定的分析研究,较全面的分析了舰船的运动情况,以及舰船的运动对直升机所承受的外载荷的影响,得到了在舰船不同运动状态下直升机的受力状况,建立了张力的计算模型,针对系留座和系留点不在同一高度这类边界条件,推导出系留索的张力计算表达式。根据所研究的舰载直升机系留问题的特点,以在某一特定的工况下让所有系留索中承受张力最大者在不同布置形式下能够取最小值为目标函数建立了优化模型,将遗传算法引入到了系留布置优化中,利用这种方法对系留点的位置进行了寻优,为系留点的位置优化布置提供了依据,设计遗传算子时充分考虑问题实际受力特点。

参 考 文 献

- [1] 航空航天工业部科学技术研究院编著1 直升机载荷手册[M]. 北京:航空工业出版社,1991. 212- 223
Aviation Academy of Science and Technology. Helicopter load handbook [M]. Beijing: China Aviation Industry Press, 1991. 212- 223. (in Chinese)
- [2] 李进军,刘士光,夏鸿飞. 舰载直升机系留计算分析[J]. 华中理工大学学报, 1996, 24(8): 94- 96.
Li J J, Liu T G, Xia H F. Mooring computation of the ship2based helicopter[J] J Huazhong Univ of Sci & Tech, 1996, 24(8): 94- 96. (in Chinese)
- [3] 李进军,刘士光,夏鸿飞. 舰载直升机系留优化设计[J]. 华中理工大学学报, 1996, .24(. 8): 97- 98.
Li J J, Liu T G, Xia H F. Optimization design of ship2

based helicopter mooring[J]. J Huazhong Univ of Sci & Tech, 1996, 24(8): 97- 98. (in Chinese)

- [4] 应祖光. 材料力学中索的张力与变形[J]. 力学与实践, 2004, 26(6): 68- 70.
Ying Z G. Tension and deformation of cable in mechanics of materials[J]. Mechanics in Engineering, 2004, 26(6): 68- 70. (in Chinese)
- [5] Lin C Y, Hajela P. Genetic algorithms in optimization problems with discrete and integer design variables[J]. Eng Opt, 1992, 19: 309- 327.
- [6] Rajeev S, Krishnamorthy C S. Discrete optimization of structures using genetic algorithms [J]. J Struc Eng, 1992, 118(5): 1233- 1250.

作者简介:



李书(1965-) 男,江苏镇江人,北京航空航天大学航空科学与工程学院教授,博士学位,研究方向飞行器结构设计。
E2mail: lishu@ buaa. edu. cn, 联系电话: 010 82316579。



何忠桓(1979-) 男,四川成都人,北京航空航天大学飞行器设计专业硕士研究生,主要从事飞机结构优化方设计。E2mail: purplemood@ase. buaa. edu. cn, 联系电话: 010 82316579。

徐丽娜(1978-) 女,河北石家庄人,北京航空航天大学北京航空航天大学飞行器设计专业硕士研究生。联系电话: 010 82316579。

(责任编辑:李铁柏)