

# 斜撑离合器中斜撑块有效升程的优化与求解算法研究

陈志豪<sup>1</sup>, 卢敏<sup>1</sup>, 李泽强<sup>2</sup>, 李伟<sup>3</sup>

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016;

2. 洛阳轴承研究所有限公司, 河南 洛阳 471039;

3. 中国航空工业集团公司金城南京机电液压工程研究中心, 江苏 南京 211100)

**摘要:**提出两种用以求解离合器有效升程的算法。在考察斜撑块运动特征的基础上提出一种有效升程的优化策略, 据此分别提出等行程法和仿凸轮反转法, 用以求解斜撑块的有效升程。选取若干标准楔块为对象, 分别运用两种方法进行求解与结构优化, 结论为两种结果相近, 与标准楔块的标准升程值对比提升较大, 验证了优化策略与算法的有效性。

**关键词:** 离合器; 有效升程; 斜撑块; 结构优化; 正向设计

**中图分类号:** TH123 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2022)04-0057-04

## Research on Optimization and Solving Algorithm of Effective Lift of Bracing Block in Bracing Clutch

CHEN Zhihao<sup>1</sup>, LU Min<sup>1</sup>, LI Zeqiang<sup>2</sup>, LI Wei<sup>3</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,

Nanjing 210016, China; 2. Luoyang Bearing Research Institute Co., Ltd., Luoyang 471039, China;

3. Jincheng Nanjing Mechanical and Electrical Hydraulic Engineering Research Center of Aviation Industry Corporation of China, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** Two algorithms are proposed to solve sprag rise. By analysis of the sprag the motion characteristics, an optimization strategy is worked out, based on which, the methods of equal-stroke and the cam-like inversion are put forward respectively to calculate the sprag rise. The two methods are used respectively to solve and optimize the structures of some selected standardized sprags, which comes to the conclusion that the two methods have similar effects and higher rise value compared with the standard one of standardized sprags, thus verifying the effectiveness of the optimized strategy and algorithms.

**Keywords:** clutch; effective lift; sprag; structure optimization; forward design

## 0 引言

直升机的三大运动部件分别是发动机、传动系统和旋翼系统。传动系统连接发动机与旋翼系统, 以实现动力的有效传递。因此, 传动系统的力学性能与可靠性是直升机整体运行性能的关键点。斜撑离合器作为传动系统的重要部件之一, 具有质量轻、承载能力大、离合可靠的特点。因此大量装载于直升机传动系统中, 实现发动机与主减速器的离合, 起到单向传递转矩的作用。

在斜撑离合器相关的研究方面, 国内外学者作了相关的理论和技术探讨, 研究内容主要集中于结构设计、动力学特性、摩擦磨损、表面涂层等方面。如 KISH J<sup>[1]</sup> 在报告中给出了离合器的详细设计理论与计算方法, 并列出了几种常用的斜撑块规格。ZHANG F 等<sup>[2]</sup> 提出了一种渐开线与偏心圆弧相结合的楔形型面, 在增加承载力的同时减少了接触应力。HUANG C 等<sup>[3-4]</sup> 运用非线性迭代方法计算斜撑块法向接触力, 并以此修正斜撑块几何型面, 达到均

衡接触应力的目的。LIU Z H 等<sup>[5]</sup> 运用行星齿轮模型模拟离合器结构件的运动, 并借助 Hunt-Crossley 接触冲击理论计算滚道和斜撑块的接触应力, 据此进行离合器的设计与分析。QING M H 等<sup>[6-7]</sup> 通过 ADAMS 软件建模仿真, 证实了制造误差将导致离合器承载能力的下降, 并提出了离合器磨损失效的判定标准。JIANG Y Y 等<sup>[8]</sup> 运用化学气相沉积技术提高斜撑块表面的耐磨性, 低循环疲劳寿命测试结果显示, 相比物理气相沉积法, 寿命提高了 5 倍。朱楚等<sup>[9]</sup> 分析了楔块与内环滚道表面磨损量对离合器自锁、总径向变形、楔块的接触角、接触应力等力学性能参数的影响。严宏志等<sup>[10]</sup> 采用分解法及坐标变换建立了楔块质心位置模型, 采用 ADAMS 软件建立了斜撑离合器动力学模型, 研究了不同质心位置的楔块对接触力及离合器接合、脱开性能的影响规律。韩红雨等<sup>[11]</sup> 根据离合器的设计需求, 研制了测试离合器单项静态性能的试验机, 能够进行离合器承载能力和滑溜角的测量。

上述前人的研究工作, 对离合器的设计制造具有良好的参考作用, 但在一些重要的基础性细节方面, 如斜撑块的有效升程方面缺乏相应的讨论和研究。因此, 专业人员

在进行离合器的相关设计与计算时,大多直接参考标准斜撑块的推荐值,以此作为设计依据和校核标准。事实上,斜撑块有效升程会随着离合器的结构差异而不同,若采用统一的推荐数据来校核新设计的离合器结构,其结果是不准确的。

以常用的圆弧型斜撑块为研究对象,考察其运动特征,得出有效升程的优化策略。在此基础上,借鉴轴承运动学原理和凸轮轮廓设计中的反转法,分别提出相应的求解算法计算离合器的有效升程。最后,选取若干标准楔块为对象,对本文的优化策略和算法进行相互验证与对比。可以预见,有效升程的优化与准确计算,是离合器正向设计的重要组成部分,对估算离合器的极限载荷也有重要的意义。

## 1 斜撑块升程分析与算法推导

圆弧型面的斜撑块,其与滚道接触的上下两个弧面,是由两个偏心圆弧组成,如图1(a)所示。随着发动机转矩载荷的施加,斜撑块从 $Q$ 点和 $C$ 点开始楔入传动。若不断增大载荷,则斜撑块逐渐翻转至最大升程,即图1(b)中的 $Q'$ 和 $C'$ 边界点,直至翻越失效。此时斜撑块翻转达到的最大高度与初始楔合高度之间的差值,被称为斜撑块的升程<sup>[1]</sup>。(说明:图1(b)中的虚线为内外滚道受斜撑块挤压变形前的初始位置)

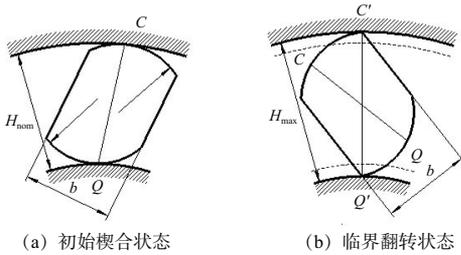


图1 斜撑块的升程

有效升程关系式为

$$S_r = H_{\max} - H_{\min} \quad (1)$$

进一步可得,在给定斜撑块宽度 $b$ 的条件下,斜撑块在临界翻转时,若斜撑块内外圆弧的边界点分别与内轴和外套同时接触(图1(b)中所示状态),则斜撑块的升程将取得最大值。此时斜撑块内外圆弧的分布必须是均衡的,若任意圆弧提前达到翻转极限,则不能取得升程最大值。下面以此论断作为斜撑块有效升程的优化策略与依据,提出两种方法从理论上求解离合器斜撑块的有效升程。

### 1.1 等行程算法

如图2所示,随着转矩载荷的施加,斜撑块从 $Q$ 点和 $C$ 点开始楔入传动。若不断增大载荷,则斜撑块在内外滚道之间逐渐滚动翻转。离合器部件一般由内外滚道、斜撑块、保持架、阻尼弹簧等结构件组成。因此,在运动特征和结构特征两方面,斜撑离合器与滚动轴承都具有较强的相似性,进而可参照轴承的运动学原理<sup>[12]</sup>,得出斜撑块运动规律:在斜撑块楔入滚道传动至临界翻转的过程中,斜撑

块相对于内轴的滚动行程与斜撑块相对于外套的滚动行程相等,即存在弧长 $CC' = QQ'$ ,可改写为运动学关系式

$$r_i \cdot \theta_i = r_o \cdot \theta_o \quad (2)$$

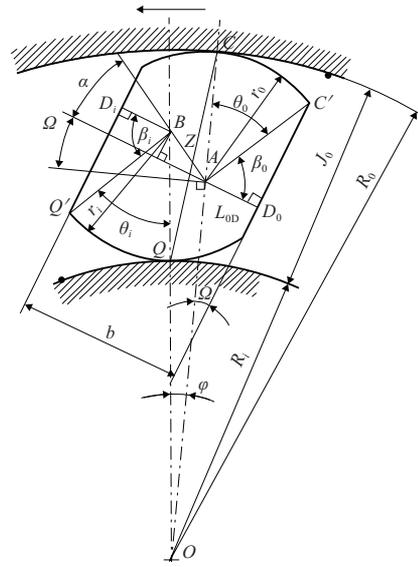


图2 斜撑块的结构与参数

在图2中, $r_i$ 、 $r_o$ 、 $\alpha$ 、 $b$ 、 $Z$  5个参数与 $J_0$ 相匹配,作为斜撑块的规格常数。其中 $r_i$ 、 $r_o$ 为斜撑块的内外圆弧型面的半径; $\alpha$ 、 $b$ 和 $Z$ 分别为斜撑块的中心角、宽度和圆心距; $J_0$ 为斜撑块的规格参数。设 $A$ 、 $B$ 和 $O$ 分别为斜撑块内外圆弧和滚道的中心; $D_i$ 、 $D_o$ 为内外圆弧中心分别向斜撑块边线作垂线的垂足点; $Q'$ 、 $C'$ 分别为内、外圆弧与滚道的翻转接触边界点。进一步地,设 $R_i$ 、 $R_o$ 为内轴、外套的半径;设 $L_{00}$ 为斜撑块外圆弧圆心至边线的垂直距离。设 $\varphi$ 分别为两圆弧中心 $A$ 、 $B$ 与滚道中心 $O$ 连线之间的夹角;设 $\Omega$ 为斜撑块的转角。此外,设 $\theta_i$ 、 $\theta_o$ 为斜撑块翻转至边界点时的转角;设 $\beta_i$ 、 $\beta_o$ 为斜撑块内外圆弧边界点所在半径与斜撑块宽度方向的夹角。下面推导上述参数之间的关系。

考察斜撑块的结构与楔合特点,在 $\triangle OAB$ 中存在余弦关系式

$$\cos(\angle OBA) = \frac{Z^2 + (R_i + r_i)^2 - (R_o - r_o)^2}{2Z(R_i + r_i)} \quad (3)$$

和正弦关系式

$$\frac{\sin(\angle OAB)}{R_i + r_i} = \frac{\sin(\angle OBA)}{R_o - r_o} \quad (4)$$

另外,容易得出:

$$\Omega = \angle OAB - \pi/2 - \alpha \quad (5)$$

式(3)-式(5)表达了斜撑块结构参数及相关变量之间的数量关系。在此基础上,可进一步得到

$$\begin{cases} \beta_i = \pi - \angle OBA - \alpha - \theta_i \\ \beta_o = \pi/2 + \Omega - \theta_o \end{cases} \quad (6)$$

和宽度 $b$ 关系式

$$b = r_i \cos \beta_i + Z \cos \alpha + r_o \cos \beta_o \quad (7)$$

由式(2)-式(7)可求得转角 $\theta_i$ 、 $\theta_o$ ,进一步得到边距 $L_{00}$ 。可以得出,参数 $L_{00}$ 的意义在于:选定斜撑块规格参数和内外滚道半径后,可运用等行程法求得边距参数 $L_{00}$ ,

使得离合器的有效升程取得优化值。

由前文可知,斜撑块的最大升程由  $Q'$ 、 $C'$  两点的距离与  $Q$ 、 $C$  两点的距离差值所确定,下面对此进行研究。根据转角  $\theta_i$  和  $\theta_0$ ,可以确定  $Q'$  和  $C'$  的位置,结合等行程法特点,在两圆弧圆心分别建立局部坐标,并以中心  $O$  为坐标原点进行平移和旋转<sup>[13]</sup>,得到各自的新坐标值。据此可以求得  $Q'$ 、 $C'$  两点之间的距离,设为  $\overline{Q'C'}$ 。

另外,在  $\Delta OAB$  中存在余弦关系式

$$\cos\varphi = \frac{(R_i+r_i)^2 + (R_0-r_0)^2 - Z^2}{2(R_i+r_i)(R_0-r_0)} \quad (8)$$

由此可以得到  $Q$ 、 $C$  两点距离

$$\overline{QC} = \sqrt{R_i^2 + R_0^2 - 2R_iR_0\cos\varphi} \quad (9)$$

最终,根据式(1)可得结构优化后的斜撑块最大升程值:

$$S_{\text{ry1}} = \overline{Q'C'} - \overline{QC} \quad (10)$$

式中  $S_{\text{ry1}}$  为等行程法所得斜撑块有效升程。

## 1.2 仿凸轮反转算法

在用作图法设计凸轮轮廓曲线时<sup>[14]</sup>,常采用反转法设计凸轮的轮廓曲线,其基本原理是假设凸轮相对静止不动,而顶杆绕凸轮中心作等角速度旋转运动。由于顶杆的尖顶始终与凸轮轮廓曲线接触,因此尖顶的运动轨迹就是凸轮的轮廓曲线。斜撑块与凸轮都类属于偏心旋转结构,且在运动过程中始终与相邻结构件存在边缘接触行为。因此,离合器的正向设计与研究,可借鉴凸轮的相关理论与方法。

假设斜撑块静止不动,同样从  $Q$  点和  $C$  点开始楔入传动,如图3所示。此时令内轴和外套绕斜撑块的外圆弧中心  $A$  点反向旋转,设中心  $O$  旋转至  $O'$  处时,斜撑块达到最大有效升程,依据上文的优化策略,此时内外圆弧上的  $Q'$ 、 $C'$  点将同时成为翻转接触点。类似于反转法,将斜撑块当作凸轮刚体,则内轴成为从动件被推动挤压,设变形后的内轴半径为  $R'_i$ 。图3中的虚线所示为斜撑块的外套圆弧与变形后的内轴圆弧。

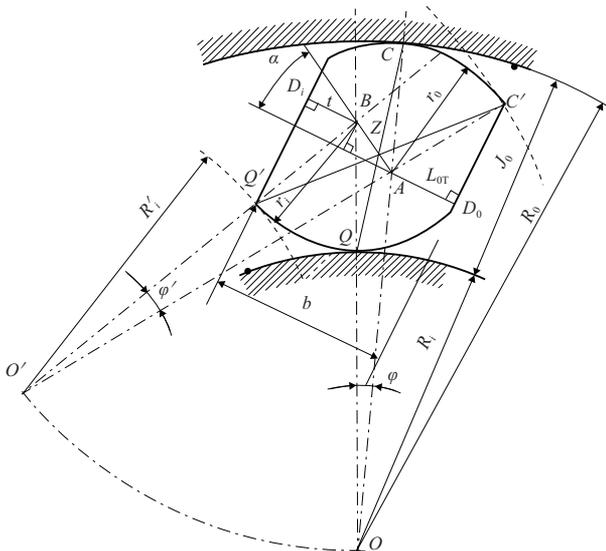


图3 仿凸轮反转算法

在图3中, $\varphi'$ 为旋转后圆心连线的新夹角; $t$ 为内圆弧圆心至斜撑块对应边缘的距离;类似地, $L_{0T}$ 为斜撑块外圆弧圆心至边线的垂直距离,其他参数的意义与图2相同。在  $\Delta Q'BD_i$  中,存在关系式

$$\cos(\angle Q'BD_i) = \frac{t}{r_i} \quad (11)$$

和关系式  $\angle ABO' = \pi - \angle Q'BD_i - \alpha$ ; 在  $\Delta O'AB$  中,存在关系式

$$\frac{\sin\varphi'}{Z} = \frac{\sin(\angle ABO')}{R_0-r_0} = \frac{\sin(\angle BAO')}{R'_i+r_i} \quad (12)$$

根据变量  $t$  可求得  $\varphi'$  和  $R'_i$ , 其中  $\angle BAO' = \pi - \varphi' - \angle ABO'$ 。此外,存在关系式  $\angle D_0C'A = \pi/2 - (\angle BAO' - \alpha)$ , 且存在  $L_{0T} = r_0 \sin(\angle D_0C'A)$ , 由此可得

$$b = L_{0T} + Z \cos\alpha + t \quad (13)$$

由式(11)-式(13)及关系式可最终得到  $\varphi'$  和  $R'_i$ , 进一步得到边距  $L_{0T}$ 。类似地,此时有

$$\overline{Q'C'} = \sqrt{R_i'^2 + R_0^2 - 2R'_iR_0\cos\varphi'} \quad (14)$$

同理,根据式(1)与式(10)可得结构优化后的斜撑块最大升程值,设为  $S_{\text{ry2}}$ 。显然, $S_{\text{ry2}}$  为仿凸轮反转法计算所得的斜撑块有效升程。

## 2 斜撑块有效升程的计算结果与分析

文献[2]中的斜撑块规格与参数,是当前离合器设计与制造的主要参考对象,其相关原始数据如表1所示。考察本文关于有效升程的两种算法,需增设内外滚道的半径参数  $R_i$  和  $R_0$ ,并据此分别求得边距  $L_{0D}$  和  $L_{0T}$ ,最终得到有效升程  $S_{\text{ry1}}$  和  $S_{\text{ry2}}$ 。将以上参数与结果数据合并列于表2中。表1、表2中的基本斜撑块规格  $J_0$  分成 A、B、C 三种,分别为  $A=6.300\ 0\ \text{mm}$ ;  $B=8.331\ 0\ \text{mm}$ ;  $C=12.700\ 0\ \text{mm}$ 。

表1 常用斜撑块参数

参数名称	基本斜撑块规格 $J_0$		
	A	B	C
斜撑块宽度 $b/\text{mm}$	3.733 4	4.927 6	7.315 2
内侧面半径 $r_i/\text{mm}$	3.251 2	4.495 8	6.731 0
外侧面半径 $r_0/\text{mm}$	3.352 8	4.521 2	7.061 2
中心距 $Z/\text{mm}$	0.416 6	0.746 8	1.206 5
中心角 $\alpha/(\circ)$	31.264 0	49.821 0	49.268 0
有效斜撑块升程 $S_i/\text{mm}$	0.228 6	0.330 2	0.558 8

表2 实例新增参数与有效升程

参数名称	基本斜撑块规格 $J_0$		
	A	B	C
内轴外半径 $R_i/\text{mm}$	12.500 0	22.225 0	62.500 0
外套内半径 $r_i/\text{mm}$	18.800 0	30.556 2	75.200 0
边距 $L_{0D}/\text{mm}$	1.705 4	2.242 5	3.261 7
边距 $L_{0T}/\text{mm}$	1.752 9	2.281 7	3.392 1

续表2

参数名称	基本斜撑块规格 $J_0$		
	A	B	C
有效升程 $S_{r1}/\text{mm}$ (增长率 $G_{r1}/\%$ )	0.307 2 (34.38)	0.449 8 (36.22)	0.675 7 (20.92)
有效升程 $S_{r2}/\text{mm}$ (增长率 $G_{r2}/\%$ )	0.306 7 (34.16)	0.449 0 (35.98)	0.694 0 (24.19)

### 3 结果的分析与讨论

分析表1和表2数据以及文中的分析与推导,可以得出以下几点:

1)斜撑块的结构参数需进行适当调整。在表1的原始参数中,应增设边距参数,同时求解有效升程。其原因在于:宽度参数与边距参数结合,才能使得斜撑块的结构完全定形,这对于正向设计是非常重要的;两种求解算法表明,有效升程与内外滚道半径也是密切相关的。因此它本质上是一个变量,表1中的有效升程应归类为推荐值。

2)斜撑块的结构优化策略是有效的。在不改变原始结构参数的条件下,仅在宽度方向增设边距参数,使斜撑块内外圆弧面与对应滚道的有效楔合弧长合理分配,当斜撑块受载翻转时内外圆弧边界点同为翻转接触点,从而获得最大升程。表2中的结果验证了此优化策略的有效性:相比表1中的推荐值,两者的平均增长率分别达到了34.274%、36.099%和22.557%。在前人的文献中对此结构细节的研究较少,但对离合器的整体性能来说,却是非常重要的。

3)等行程算法与仿凸轮反转算法相互验证,结果表明两种算法是可行的。基于文中的优化策略,借鉴轴承及凸轮的运动学原理和设计方法,分别对斜撑块结构特征进行解析,推导出有效升程的计算方法和新的边距参数。将表2中两种算法得到的升程进行对比,相对偏差只有0.081%、0.089%和1.336%。即两种算法所得结果非常接近,离散性很小,因此它们是非常有效且相对准确的。

4)文中的两种算法是有一定误差的。首先,等行程算法基于滚动轴承中圆球形滚子的运动特征,但斜撑块的结构是基于两个偏心的圆弧,楔合翻转过程中的内外滚道和斜撑块本身都发生挤压变形,以致离合器的各结构参数发生变化,因此计算结果也相应存在误差。这里参考形位公差中圆度的确定方法,来进行斜撑块误差的度量,可表示为关系式

$$\varepsilon = \frac{S_r}{J_0} \quad (15)$$

式中  $\varepsilon$  为斜撑块的圆度误差。下面将优化后的3种标准斜撑块的  $\varepsilon$  值列于表3中。

表3 斜撑块的圆度误差

规格 $J_0/\text{mm}$	A	B	C
圆度误差 $\varepsilon/\%$	4.876 2	5.399 1	5.320 5

可见,斜撑块的圆度误差在5%左右,这是导致有效升程的求解结果具有一定误差的原因。其次,仿凸轮反转算法将斜撑块视为刚体,以致变形集中于内轴,故此求解的结果与实际变形也存在差异,因此也是有一定误差的。

### 4 结语

本文提出的关于斜撑离合器有效升程的优化策略及求解算法,是以圆弧型面的离合器为研究对象的。但鉴于摩擦式离合器工作原理的相似性,本文所涉及的原理和算法可以覆盖强制约束和全相位两种类型的离合器结构,也可以覆盖诸如阿基米德螺线型面和对数螺线型面等其他结构形式的离合器。

#### 参考文献:

- [1] KISH J. Helicopter freewheel unit design guide [R]. [S.I.]: Defense Technical Information Center, 1977.
- [2] ZHANG F, GAO Z F, LU W H. The analysis and design of a new type wedge surfaces of sprag overrunning clutch [J]. Advanced Materials Research, 2013, 823: 43-46.
- [3] HUANG C, ZHAO Y Q, LIU M. Analytical modeling and optimization of logarithmic sprag clutch considering profile modification [J]. Shock and Vibration, 2018, 2018: 1-13.
- [4] HUANG C, LIU M, ZHAO Y Q. An analytical model of multiarc sprag clutch considering geometry and internal interaction during engagement [J]. Shock and Vibration, 2017, 2017: 1-13.
- [5] LIU Z H, YAN H Z, CAO Y M. Design and analysis of logarithmic spiral type sprag one-way clutch [J]. Journal of Central South University, 2015, 22(12): 4597-4607.
- [6] QING M H, YAN H Z, TAN W Z. The effects of the manufacturing errors of a group of sprags on the engagement properties of sprag clutch [J]. Advanced Materials Research, 2013, 744: 18-22.
- [7] QING M H, YAN H Z, TAN W Z. Research on the failure judgment of sprag clutch based on wear loss [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 378: 329-334.
- [8] JIANG Y Y, YANG Z R, SHI K H. Improve the wear resistant life of the sprag clutch by used the chemical vapor deposition technology [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 86: 260-262.
- [9] 朱楚, 朱如鹏, 靳广虎. 对斜撑超越离合器力学性能的影响分析 [J]. 机械制造与自动化, 2012, 41(5): 11-13, 20.
- [10] 严宏志, 王志标, 朱楚, 等. 楔块重心位置对斜撑离合器性能的影响 [J]. 中国机械工程, 2021, 32(3): 253-260.
- [11] 韩红雨, 宗晓明, 张作超, 等. 斜撑式超越离合器静态试验机 [J]. 轴承, 2020(8): 52-55.
- [12] 冈本纯三. 球轴承的设计计算 [M]. 黄志强, 译. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [13] FARID A. 计算机辅助设计与制造 [M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2016.
- [14] 郑树琴. 机械原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.

收稿日期: 2021-01-25