

文章编号: 1000-8055(2004) 03-0338-04

径向式可变几何旋流器开度特性计算方法

李 功¹, 李长林²

(1. 西北工业大学 发展计划处, 陕西 西安 710072;

2. 西北工业大学 能源与动力学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 介绍了径向式可变几何旋流器开度特性计算方法, 随着航空发动机推重比(p/w)的不断提高, 涡轮前温度在逐年提高, 目前先进发动机涡轮前温度高达1 800 K。燃烧室工作油气比(F/A)将由0.02增至0.03, 为了保证发动机燃烧室在较宽的工作油气比范围内具有最佳性能, 采用径向式可变几何旋流器是有效技术途径之一, 本文从数学关系上建立了该种旋流器开度特性 的计算方法并给出算例。可供可变几何燃烧室设计参考。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 可变几何旋流器; 开度特性; 可变几何燃烧室

中图分类号: V 231. 1+ 6

文献标识码: A

Computational Method for Open Degree Characteristics of Radial Direction Variable Geometry Swirl

LI Gong, LI Chang-lin

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The paper describes a computational method for open degree characteristics of radial direction variable geometry swirl. With the increase of aero-engine's propulsive-weight ratio (p/w), the temperature ahead of turbine has increased yearly. Now this temperature of advanced engine is as high as 1800 K and at the same time the fuel-air ratio (F/A) of combustion chamber increases up to 0.03 from 0.02. To ensure the best combustion performance when the chamber works in wide range of F/A , one of the effective technical approaches is to adopt variable geometry swirl. In this paper a mathematical relationship for the open degree characteristics of the swirl is formulated and examples are presented. All these can be used as reference to the combustion chamber designs.

Key words: aerospace propulsion system; variable geometry swirl; open degree characteristic; variable geometry combustion chamber

随着航空发动机推重比的提高, 涡轮前温度也逐年提高, 这就意味着发动机燃烧室工作油气比不断展宽, 为了保证在广阔的油气比范围内燃烧室具有最佳综合性能, 采用叶片可调的径向式可变几何旋流器是有效技术途径之一^[1~4]。本文给出了圆弧叶片径向式可变几何旋流器开度特性

的计算方法, 即旋流器叶片喉道面积 A_{α} 随叶片调节角度 β 的变化 $A_{\alpha}=f(\beta)$, 在此基础上就可以根据不同工况的流量分配需要, 通过调节 β 角使燃烧室在广阔的工作范围内获得适合头部的油气比匹配和最佳综合性能。

1 可变几何旋流器的结构和调解方案

本文研讨的可变几何旋流器结构见图1，其中1为旋流器的后端板，B面有与火焰筒装配螺纹， A_1 为旋流器出口的环形通道面积。图中2为带滑槽的转动轴(在 R_2 上)，叶片可由径向插入滑槽，当拨盘7旋转时就可以通过叶片上部凸销带动叶片沿 R_1 外园旋转，此时相对转动轴2，叶片进行转动加滑动的二维运动，从而实现对叶片出口通道面积 A_{α} 的调节。图中4为旋流器的前端板，前端板与后端板中间有5个弧形支板，精密整体铸造。图中5为旋流器的内环，其功能是形成空气出口环行通道，对燃油雾化可视为气动雾化空气罩。图中6为其他叶片。图中7为调解拨盘，结构特点有：在 R_1 园上有与叶片数相等的轴孔，用

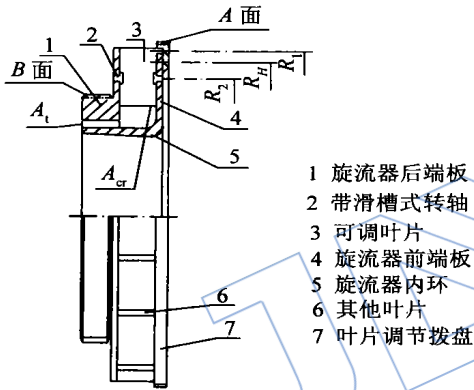


图1 旋流器结构图
Fig. 1 Swirl structure drawing

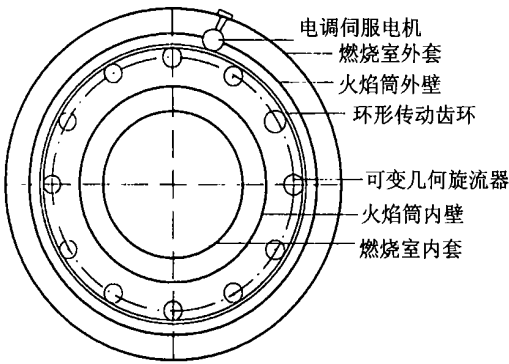


图2 可变几何旋流器调节原理
Fig. 2 Variable geometry swirl regulating principle

于拨动叶片上部凸轴，使叶片转动。在 R_H 园上均匀分布4个腰子型孔，其长为 $l= R_H \cdot \theta$ 由设计叶片给定，腰子型孔中各有一个固定螺钉，保证拨

盘可以转动又不会与前端板4脱落。拨盘外园 A 面有30 弧长的精密齿牙，用于调节齿环带动拨盘转动。总体调解原理见图2。

当发动机根据高度、速度特性，给出燃烧室所需的最佳头部油气比匹配时，便提供了控制可变几何旋流器所需要的进气量和 A_{α} 通道面积的信息，并通过计算机控制电调伺服电机带动环形传动齿环，齿环即可带动全部旋流器拨盘转动。根据开度特性 $A_{\alpha}= f(\beta)$ 进入所需调节状态，使燃烧室在新的状态下获得最佳性能。

2 可变几何旋流器工作原理和计算模型

已知条件：本文计算的旋流器为径向进气式叶片可调节旋流器，具体几何关系见图3圆弧 BAC 为叶片1，弧心在 M 点叶片，圆弧 EDF 为相邻叶片，其中 A 和 D 为两叶片旋转及滑动约束点。当叶片根据调节规律给出指令 β 角，叶片1由 B 点沿外园调至 B' 点，叶片2由 E 点调至 E' 点。这里应注意，因为 B 和 E 点在外园 R_1 上滑动，两个叶片相对 A 和 D 点是既有转动又有滑动的二维运动。由以上图1可以看出当旋流器由状态1调节至状态2时，叶片间的通道(喉道)由 CK 增大到 CK' 。由旋转射流物理特性可以看出 β 增大喉道面积减少，射流速度及旋转半径增大，旋流数增强； β 减少喉道面积增大，射流速度及旋转半径减少，旋流数减少。这种开度和旋流数(度量旋流强度的准则参数)随 β 的变化规律正好和燃烧室慢车和大车时燃烧室工作流量分配和燃烧稳定性需要相一致。从而达到改善燃烧室性能的目的。

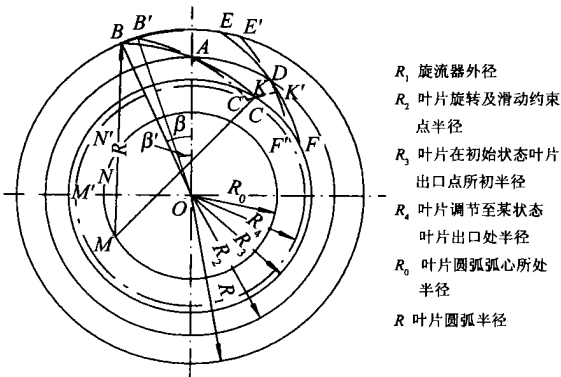


图3 旋流器原理图
Fig. 3 Swirl schematic diagram

3 开度特性 $A_{rc} = f(\beta)$ 计算方法

3.1 计算模型

本文计算的旋流器开度特性设定参数如表1。

表1 旋流器参数

Table 1 Parameters of swirl

R/mm	35
R_1/mm	30
R_2/mm	25
R_3/mm	21
R_0/mm	15
$\angle BAC = \angle DEF/\text{mm}$	29
B/mm	6
$\beta/^\circ$	22 计算范围 $20^\circ \sim 12^\circ$

3.2 计算方法

以上各已知参数的几何意义见计算模型图4
计算步骤:

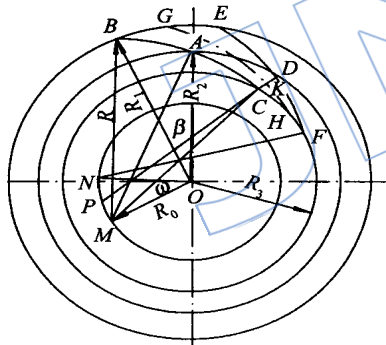


图4 计算模型图

Fig. 4 Computing model

(1) 以 R 叶弧半径, 以 $\beta = 22^\circ$ 定点在 R_0 上取 M 点画出叶片 BAC (第一个叶片);

(2) 以叶片数 n 取周角 $\omega = 2\pi/n$ 定第二个叶片在弧心径上取弧心 N 点;

(3) 以 N 为心 R 为半径做弧 EDF 得到第二个叶片;

(4) 做两个叶片中间通道的中心流线, 取 $\omega/2$ 定 P 点, 以 P 为心、 R 为半径得中心流线 GKH ;

(5) 因 PC 交于 K 至 D , 则 CD 即为垂直中心流线的流面;

(6) 引用如下推导公式求出 PD 及 PC , CD

$= PD - PC$ 可求; 由此可求出通道面积:

$$A_{cr} = CD \cdot B \cdot n$$

4 计算公式推导

(1) 计算已知条件: R_1, R_2, R_3, R_0, R , 叶弧长 ABC , 叶片数 n 和叶片宽 B 。

(2) 求 $\overline{PC}$, 由三角形性质及余弦定理可得:

$$\overline{PC} =$$

$$(R_0^2 + \overline{OC}^2 - 2\overline{OC}R_0\cos\angle POC)^{1/2} \quad (1)$$

给出变量 β

$$\overline{AB} = (R_1^2 + R_2^2 + 2R_1R_2\cos\beta)^{1/2} \quad (2)$$

$$\angle MAB = \cos^{-1}\left[\frac{\overline{AB}}{2R}\right] \quad (3)$$

$$\angle BMA = \pi - 2\angle MAB \quad (4)$$

$$\angle AMC = \theta - \angle AMB \quad (5)$$

$$\overline{AC} = 2R(1 - \cos\angle AMC)$$

$$\overline{OC} =$$

$$(R^2 + \overline{AC}^2 - 2R\overline{AC}\cos\angle OAC)^{1/2} \quad (6)$$

求角 $\angle OAC$ 及 $\angle POC$

$$\angle MAC = \frac{1}{2}\pi - \frac{1}{2}\angle AMC \quad (7)$$

$$\angle OAC = \angle MAC - \angle MAO \quad (8)$$

其中:

$$\angle MAO = \angle OAB - \angle MAB$$

$$\angle OAB = \pi - \arcsin(R_1\sin\beta/\overline{AB})$$

由余弦定理得:

$$\angle AOM = \arccos \frac{R_2^2 + R_0^2 - R^2}{2R_2 \cdot R_0} \quad (9)$$

$$\angle POA = \angle AOM - \frac{\omega}{2} \quad (10)$$

$$\angle AOC = \arcsin \left[\sin\angle OAC \cdot \frac{\overline{AC}}{\overline{OC}} \right] \quad (11)$$

$$\angle POC = \angle POA + \angle AOC \quad (12)$$

将以上各式代入 (6) 式求 $\overline{OC}$, 将 $\overline{OC}$ 及 $\angle POC$ 代入 (1) 式则 $\overline{PC}$ 可求。

(3) 求 $\overline{PD}$

对 $\triangle PND$ 引用余弦定理:

$$R^2 = \overline{PN}^2 + \overline{PD}^2 - 2\overline{PN} \cdot \overline{PD}\cos\angle NPC \quad (13)$$

$$\angle OPC = \frac{\pi}{2} - \frac{\omega}{4} \quad (14)$$

$\angle OPC = \arcsin (\overline{OC} \sin \angle POC / \overline{PC})$ (15)

$\angle NPC = \angle OPN - \angle OPC$ (16)

$\overline{PN} = 2R_0 \sin \frac{\omega}{4}$ (17)

以上各式代入 (13) 式, 并令:

$A = 2 \overline{PN} \cos \angle NPC$

$B = \overline{PN}^2 - R^2$

解式 (13) 含 $\overline{PD}$ 的二次方程, 则:

$\overline{PD} = \frac{A + \sqrt{A^2 - 4B}}{2}$

(4) 叶片喉道缝宽:

$\overline{CD} = \overline{PD} - \overline{PC}$

$A_{cr} = B \times \overline{CD} \times n$

给出不同的 β 角开度特性, $A_{cr} = f(\beta)$ 可求。

5 算例分析

本文设定可变几何旋流器原始参数如下:

$R_1 = 30\text{ mm}$, $R_2 = 25\text{ mm}$, $R_3 = 21\text{ mm}$, $R_0 = 15\text{ mm}$, 叶片宽 $B = 6$ 、叶片弧长为 29、叶片数 $n = 10$ 、叶弧半径 R 分别为 29 mm、35 mm 和 39 mm 三种情况, 进行开度计算时, β 角在 12 ~ 20 范围内取值计算, 得到该旋流器开度特性 $A_{cr} = f(\beta)$ 如图 5 所示, 由图 5 可知。

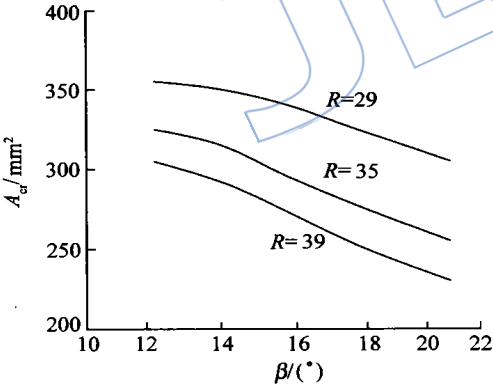


图5 旋流器开度特性曲线

Fig. 5 Curve of swirl open degree characteristic

(1) 三种叶片喉道面积 A_{cr} 均随 β 的减少而增大。

(2) 当 $R = 29\text{ mm}$ 时 β 由 20 减少到 12 时叶片喉道面积 A_{cr} 增大 14.8%;

当 $R = 35\text{ mm}$ 时 β 由 20 减少到 12 时叶片

喉道面积 A_{cr} 增大 24.6%;

当 $R = 39\text{ mm}$ 时 β 由 20 减少到 12 时叶片喉道面积 A_{cr} 增大 31.6%;

由图 5 可知当 R 越大, 对可变几何旋流器喉道面积的调节越有效。

(3) β 增大则 A_{cr} 减少, 气流加速且射流旋流旋转半径增大, 两个因素使旋流器的旋流数增大, 燃烧室回流区加大, 燃烧稳定性加强。旋流数 $S = f(\beta)$ 的变化规律见图 6。

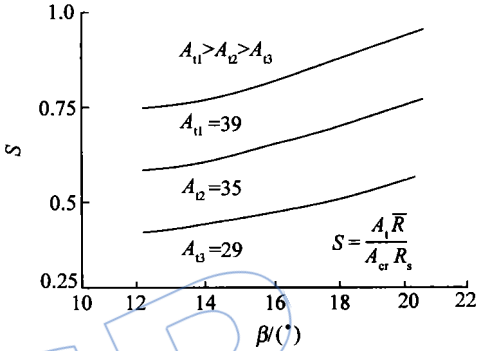


图6 旋流 S 随开度角 β 的变化规律

Fig. 6 Changing law of swirl number S with open degree corner β

(4) 图 6 中还给出了径向旋流器出口环道面积 A_t 对旋流数的影响, 当环道面积 A_t 增加则出口轴动量力减少、旋流数增加, 可以提高火焰稳定性; 当 A_t 减少则出口轴动量增加、旋流数下降, 燃烧室回流区变小。

6 结 论

由以上计算讨论可知, 本文给出的燃烧室径向可变几何旋流器开度特性计算方法, 在设计应用中理论上是可行的, 设计者可根据燃烧室不同工况对流量分配和燃烧稳定性的需要进行优化设计, 或根据发动机的高度速度特性, 给出燃烧室优化的头部油气比匹配规律及相应的可变几何旋流器开度特性并配以电调就可以保证燃烧室在较宽广的工作范围内具有最佳性能。

参考文献:

[1] 金如山. 高温升燃烧室技术 [J]. 国际航空, 1989, (1): 34- 36.
[2] 李长林. 航空发动机主燃烧室设计 [M]. 北京: 航空工业出版社, 1984.
[3] 宁木昆. 燃烧室气动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1989.