

三对转涡轮及其基本分析

中国科学院工程热物理研究所
北京航空航天大学

蔡睿贤*
魏星禄

【摘要】 本文对文献 [1] 提出的三对转涡轮进行了较为详细的基元级分析。首先模拟常规涡轮分析, 定义了 16 种可能的典型级。按此定义以及本文建议的级独立自变变量, 就可得到很简明的不同典型级的功率特性式。针对这种级的可能应用场合——三轴涡轮发动机的具体要求, 分析了各种典型级的适用情况。这种涡轮可得到比常规级高得多的功率系数而且效率也会有所改善。

一、前言

对转涡轮在降低发动机的尺寸、重量和造价, 减轻陀螺力矩与提高机组的效率和机动性等方面都有其独特优点, 尤其适宜用于带动对转无涵道风扇^[1, 2]。有关它的分析已有过一些文献发表^[1~3]。其中文献 [1] 建议了一种适宜用于三轴涡轴发动机的三对转涡轮新设想。本文按照文献 [1] 的分析思路, 对这种新设想进行比较全面的基本分析, 并指出其合用的具体方案。这种设想的示意图见图 1。图中定义了 1~3 与 4 等 4 个轴向截面; A、B 与 C 则各为对转的高、中与低压涡轮, 其前的静叶也可能并不需要 (见后)。叶轮机械中能使气流运动状态基本恢复原状的最少叶列组合可被认为是一级^[1]。三对转涡轮由于其具体结构限制, 一般只能由图 1 所示的三排对转叶列与其前 (或后) 的静叶 (有时可无静叶) 合成的一个级所组成。所以三对转涡轮是单级涡轮, 其基本分析只用分析单级的情况。为提高涡轴发动机单级涡轮的作功效率, 通常设计成轴向排气, 即 $C_{u4} = 0$ 。下面要用到这个条件。为公平比较由不同叶列数组成的各种级的负荷能力, 不用一般的级负荷系数 $\bar{h}^* = h^* / u_A^2$, 而改用单位叶列负荷系数 $\bar{h}^* = \bar{h}^* / m$ 来表达不同级的负荷能力^[1]。 h^* 代表级负荷, u_A 表示第一列动叶圆周速度。 m 为一级叶列数。这样能够更准确地表示单位涡轮长度或单位重量的作功能力。另外, 当 u_A 不是三个圆周速度值中最大者时, 则 $\bar{h}^*$ 示式中分母的 u 应代入最大的圆周速度值, 以反映强度与气动上的约束。

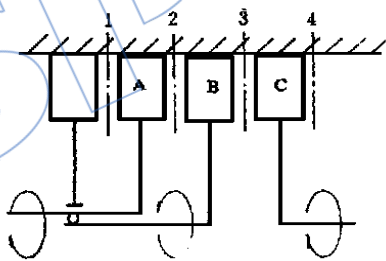


图 1 三对转涡轮示意图

二、三对转涡轮基元级的典型分类

在常规涡轮的经典基元级分析中, 先定义两种典型级: 冲击式与反力式, 然后对之分析,

以了解其基本特性。在文献 [1] 中继承了已有传统, 定义了对转涡轮的不同典型级, 由此得出了很简明清楚分类办法与特性示式。本文也将沿用此一分析方法: 对一排动叶栅, 如其进、出口相对切向分速度大小相等, 方向相反, 即 $W_{u1} = -W_{u2}$, 则定义此动叶栅是冲击的, 以字母 I 表示。这样定义的冲击叶栅通常可以确保叶栅流道内总的略有压降, 不会有扩压。我

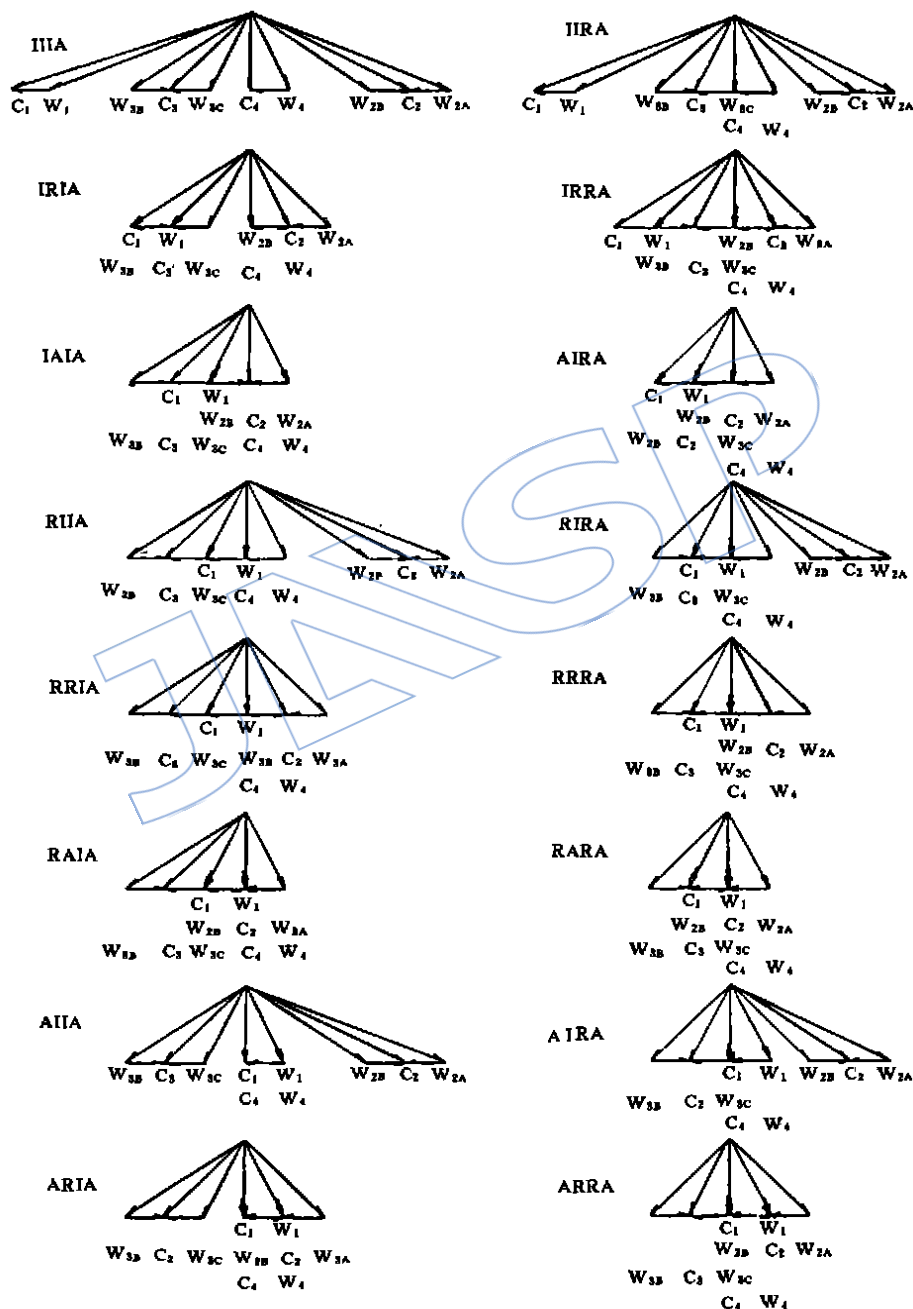


图 2 典型三对转涡轮基元级的速度三角形

们取这种情况为叶栅反力度的下限。其次，如一排动叶栅的进口相对切向分速 $W_{u_i} = 0$ ，则定义它是反力的，以字母 R 表示。另外，如一排动叶栅的进口绝对切向分速 $C_{u_i} = 0$ ，则定义它是轴向进气的，以字母 A 表示。这种动叶栅作为首列动叶时有可能省掉前面的静叶，但动叶承受温度就要较高。我们取这种情况为叶栅反力度的上限。其实，I、R 与 A 三种典型叶栅，就是相应反力度逐渐增大的三种典型涡轮动叶栅。而反力度小于 I 或大于 A 的情况没有实用价值。正如前述，三对转涡轮因结构条件，一般只用单级，且为减少排气动能损失而设计成近于轴向排气 $C_{u_4} = 0$ 。所以在本文中只有一个典型排气条件：轴向排气，且用字母 A 代表。

这样，不同的典型三对转涡轮可以由四个字母表示。头三个字母分别顺序代表三排对转动叶栅的典型情况，分别可以是 I、R 或 A；最后一个字母用 A 表示级的排气情况。例如 IIIA，ARIA 等。这样排列下来似乎可以有 27 种典型三对转涡轮级。但其实有两个 A 字母相连的级无实际意义，所以按上述分类只有 16 种有意义的典型三对转涡轮级，它们的名字与速度三角形分别见于图 2。为简便起见，图中只画出 $C_{1Z} = C_{2Z} = C_{3Z} = C_{4Z}$ ， $u_A = u_B = u_C$ 的特例，并令各种典型级的 C_Z 与 u 均各各相等。但在下节的分析中并没加此条件。

三、三对转涡轮基元级的独立变数与功率特性

文献 [1] 中按照经典理论，在认为气流损失是速度三角形的函数的条件下，分析出对转涡轮基元级的独立自变变量是 8 个。同理可推出，三对转涡轮基元级的独立自变变量是 11 个：表达这种基元级流动情况的共有 6 个速度三角形（图 2），于是有 $6 \times 3 = 18$ 个自变变量；但其中各速度三角形的底边（圆周速度）各有三对彼此相等，分别是 u_A 、 u_B 与 u_C ，另外还各有两个三角形共边 $\bar{C}_2$ 与 $\bar{C}_3$ ，所以要去掉 7 个自变变量，而只剩下 11 个独立自变变量。

上节的分类法中每种级的名字（4 个字母）其实就相当于规定了 4 个独立自变变量。另外 7 个自变变量首先应取三排动叶栅的圆周速度 u_A 、 u_B 与 u_C 或 u_A 与另外两个无因次转速 $\bar{n}_B = u_B/u_A$ 与 $\bar{n}_C = u_C/u_A$ ，因为它们决定了气动与强度特性，是涡轮的关键变量。另外 4 个可考虑选用 4 个流量系数 C_{1Z} 、 C_{2Z} 、 C_{3Z} 与 C_{4Z} ，因为它们是决定子午通道形状的关键参数，而且与本文的基元级分类法相配合，可以得到很明显简单的级特性示式。

这样，我们就可以很容易推导出上述 16 种典型级的运动（角度）与功率特性的解析表达式。其功率特性见表 1。

表 1 各种典型级的功率特性示式

	$\bar{h}_A^*$	$\bar{h}_B$	$\bar{h}_C$		$\bar{h}_A^*$	$\bar{h}_B$	$\bar{h}_C$
IIIA	$2(1 + 2\bar{n}_B + 2\bar{n}_C)$	$2\bar{n}_B(\bar{n}_B + 2\bar{n}_C)$	$2\bar{n}_C^2$	IIRA	$2(1 + 2\bar{n}_B + \bar{n}_C)$	$2\bar{n}_B(\bar{n}_B + \bar{n}_C)$	$\bar{n}_C^2$
IRIA	$2(1 + \bar{n}_B)$	$\bar{n}_B(\bar{n}_B + 2\bar{n}_C)$	$2\bar{n}_C^2$	IRRA	$2(1 + \bar{n}_B)$	$\bar{n}_B(\bar{n}_B + \bar{n}_C)$	$\bar{n}_C^2$
IAIA	2	$2\bar{n}_B\bar{n}_C$	$2\bar{n}_C^2$	IARA	2	$\bar{n}_B\bar{n}_C$	$\bar{n}_C^2$
RIIA	$1 + 2\bar{n}_B + 2\bar{n}_C$	$2\bar{n}_B(\bar{n}_B + 2\bar{n}_C)$	$2\bar{n}_C^2$	RIRA	$1 + 2\bar{n}_B + \bar{n}_C$	$2\bar{n}_B(\bar{n}_B + \bar{n}_C)$	$\bar{n}_C^2$
RRIA	$1 + \bar{n}_B$	$\bar{n}_B(\bar{n}_B + 2\bar{n}_C)$	$2\bar{n}_C^2$	RRRA	$1 + \bar{n}_B$	$\bar{n}_B(\bar{n}_B + \bar{n}_C)$	$\bar{n}_C^2$
RAIA	1	$2\bar{n}_B\bar{n}_C$	$2\bar{n}_C^2$	RARA	1	$\bar{n}_B\bar{n}_C$	$\bar{n}_C^2$
AIIA	$2(\bar{n}_B + \bar{n}_C)$	$2\bar{n}_B(\bar{n}_B + 2\bar{n}_C)$	$2\bar{n}_C^2$	AIRA	$2\bar{n}_B + \bar{n}_C$	$2\bar{n}_B(\bar{n}_B + \bar{n}_C)$	$\bar{n}_C^2$
ARIA	$\bar{n}_B$	$\bar{n}_B(\bar{n}_B + 2\bar{n}_C)$	$2\bar{n}_C^2$	ARRA	$\bar{n}_B$	$\bar{n}_B(\bar{n}_B + \bar{n}_C)$	$\bar{n}_C^2$

由表可见, 上述分类及选用自变量后, 其无因次功率特性的确是非常简明的: 它们只是 $\bar{n}_B$ 与 $\bar{n}_C$ 的函数。不同典型级的 $\bar{h}_C^*$ 只有两种表达式; 级名后面两个字母是 IA 的比是 RA 的大一倍。不同典型级的 $\bar{h}_B^*$ 只有 6 种表达式。其中各种名字典型级 $\bar{h}_B^*$ 之间的关系有: 其它字母相同, 级名第二个字母是 I 的 $\bar{h}_B^*$ 比是 R 的大一倍, 而是 R 的比是 A 的大 $\bar{n}_B^2$ 。不同典型级的 $\bar{h}_A^*$ 有 11 种表达式, 这些表达式彼此之间也有很多相似之处。例如, 级名其它字母相同, 则第一个字母是 I 的 $\bar{h}_A^*$ 比是 R 的大一倍, 而是 R 的则比是 A 的多 1。

四、各种典型级的比较与选取

在文献 [1] 中对不同双对转涡轮基元级的效率进行了对比, 得出的大致规律是: 级名中有 R 的比有 A 的效率要高些, 而级名中有 I 的效率要更低; 对转级比同样单位叶列负荷的经典顺级有更高的效率。这个规律对三对转涡轮基元级也基本适用。

三对转涡轮级一般是用来作为三轴涡轴发动机之用的, 所以其应用也要符合这种发动机的匹配规律: 通常地面的三轴涡轴发动机或航空用三轴涡桨式发动机的高、低压压气机设计转速匹配比为 1 ~ 0.7 左右; 在考虑将双轴涡喷或切顶涡扇发动机改为地面用时, 涡喷及低涵道比涡扇的高、低压转速比也是在 0.7 左右, 而高涵道比涡扇则可能低到 0.4 左右。在结构上最方便的布置是高、中压涡轮分别带高、低压压气机, 低压涡轮输出动力。因此 $\bar{n}_B$ 通常应为 0.7 左右, 但也可能要小一些。按普通双轴压气机装置的要求, 一般还希望 $\bar{h}_A^* / \bar{h}_B^* \approx 1$ 或略大一些。另外, 对现有参数简单循环燃气轮机, 压气机耗功约为输出功的两倍; 但随着参数的提高, 此比值也可能降到 1.5 倍。因此, 有 $\bar{h}_C^* = (\bar{h}_A^* + \bar{h}_B^*) / (2 \sim 1.5)$ 。在可能时, 动力输出轴转速 $\bar{n}_C$ 以低点为宜, 以便可降低减速齿轮箱的造价、大小与重量, 或者可取消它。

由于各种典型级的 $\bar{h}_A^*$ 、 $\bar{h}_B^*$ 与 $\bar{h}_C^*$ 均是 $\bar{n}_B$ 与 $\bar{n}_C$ 的函数, 5 个变数 3 个关系式, 因此如我们规定了另外两个关系式, 例如 $\bar{h}_C^* = f(\bar{h}_A^*, \bar{h}_B^*)$ 与 $\bar{n}_B$ 的值, 对每种典型级就可以解出其功率特性与转速特性数据。表 2 中列出了各种典型级在 $\bar{h}_C^* = (\bar{h}_A^* + \bar{h}_B^*) / 2$ 与 $\bar{n}_B = 0.7$ 时的情况。为考虑可能的变化, 表 2 还分别列出了将 $\bar{h}_C^*$ 改为等于 $(\bar{h}_A^* + \bar{h}_B^*) / 1.5$ 或将 $\bar{n}_B$ 改为 0.5 时的情况。由表 2 可以看出, 在上述变动范围内同样典型级的功率与转速特性变动不是很大, 那些典型级适用于三轴涡轮发动机基本不因这些变动而有明显变化。例如, 在表 2 中的情况, 如果考虑用对转涡轮的主要目的是要降低发动机的尺寸与重量, 要求总的功率系数 $\bar{h}^*$ 较大, 则级名第三个字母是 R 的基本都不合适; 如果再希望 $\bar{h}_A^* / \bar{h}_B^*$ 不要远离 1, 输出轴转速 $\bar{n}_C$ 不要太大, 则较合适的典型级可能是 RR1A 与 IA1A 或者 A11A、R11A 与 IR1A。前二者的 $\bar{n}_C$ 较小; 后三者 $\bar{n}_C$ 则较大, 会抵销一些 $\bar{h}^*$ 较大的好处。在主要希望效率较高与匹配较合理时, 则 RRRA、RR1A、RARA 与 RA1A 可能较好。当然, 在具体设计时, 也可以用两种相近典型级 (级名中只有一个字母不同, I 与 R 或 R 与 A 互相替代) 中间情况的基元级。例如 RRRA 与 RR1A 之间的级就会功率比前者要高, 而输出轴转速及 $\bar{h}_A^*$ 与 $\bar{h}_B^*$ 的匹配却会更好。

如果用常规的冲击式或反力式涡轮级, 为达到上述的 $\bar{n}_B = 0.7$, $\bar{h}_C^* = (\bar{h}_A^* + \bar{h}_B^*) / 2$, 且希望 $\bar{h}_A^* \approx \bar{h}_B^*$ 及 $\bar{n}_C < 1$, 最简单的匹配可取高压涡轮为反力式单级, 中、低压涡轮均为冲击式单级。这时可得 $\bar{h}_A^* / \bar{h}_B^* = 1.02$, $\bar{n}_C = 0.704$, $\bar{h}^* = 0.495$ 。其功率特性显然低于相当的三对转涡轮。如果在结构与轴系上有所变化, 例如改用中压涡轮输出动力 (这样燃气轮机装置的变工况情况较佳), 而分别用高、低压涡轮带动高、低压压气机 (这时高、低压压气机要分开, 结构上不够紧凑, 但却为中间冷却提供方便)。同上理可以认为这时的典型要求是 $\bar{n}_C = 0.7$, $\bar{h}_A^*$

+ $h_C^* = 2h_B^*$, 从而也计算出与表 2 类似的匹配情况。可知这时以 RAIA 典型级较合适; 此时输出轴转速 $\bar{n}_B = 0.707$, 高、低压轴功率比 $h_A^* / h_C^* = 1.020$, 单位叶列功率系数 $\bar{h}^* = 0.743$ 。对于三轴发动机其它可能的轴系与结构, 也可进行类似的分析。

表 2 各种典型级的功率与转速特性匹配情况

	$\bar{n}_B = 0.7, h_A^* + h_B^* = 2h_C^*$			$\bar{n}_B = 0.7, h_A^* + h_B^* = 1.5h_C^*$			$\bar{n}_B = 0.5, h_A^* + h_B^* = 2h_C^*$		
	$\bar{n}_C^*$	h_A^* / h_B^*	h^*	$\bar{n}_C^*$	h_A^* / h_B^*	h^*	$\bar{n}_C^*$	h_A^* / h_B^*	h^*
IIIA	2.322	1.883	1.500	2.925	1.799	1.250	2.049	2.652	1.500
IRIA	1.177	1.591	1.500	1.396	1.391	1.250	1.035	2.335	1.500
IAIA	0.903	1.581	1.224	1.083	1.320	1.250	0.843	2.372	1.066
RIIA	1.698	1.011	1.500	2.129	0.959	1.250	1.435	1.445	1.500
RRIA	0.935	0.945	1.312	1.119	0.827	1.250	0.798	1.431	0.956
RAIA	0.705	1.014	0.745	0.856	0.834	0.916	0.640	1.562	0.615
AIIA	1.577	0.844	2.000	1.997	0.821	1.667	1.291	1.162	2.000
ARIA	0.748	0.455	1.119	0.905	0.398	1.024	0.576	0.606	0.663
IIRA	2.751	2.132	0.750	3.400	2.020	0.625	2.427	3.025	0.750
IRRA	1.581	2.130	0.750	1.861	1.897	0.625	1.406	3.148	0.750
IARA	1.190	2.401	0.750	1.411	2.024	0.625	1.133	3.531	0.750
RIRA	2.032	1.159	0.750	2.501	1.094	0.625	1.725	1.674	0.750
RRRA	1.236	1.254	0.750	1.464	1.122	0.625	1.069	1.912	0.750
RARA	0.903	1.581	0.612	1.083	1.320	0.625	0.843	2.372	0.533
AIRA	1.845	0.911	1.000	2.292	0.881	0.833	1.500	1.250	1.000
ARRA	0.966	0.600	0.933	1.154	0.539	0.833	0.750	0.800	0.563

结论 (1) 本文对三对转涡轮进行了较为详细的基元级分析。这种涡轮特别适合用于三轴涡轴发动机。(2) 本文规定了 16 种典型的三对转涡轮级, 并提出了选取反映级特性的自变变数的方案。按此可以导得这 16 种典型级的非常简明的功率特性示式。(3) 针对三轴涡轴发动机的具体要求, 分析了各种典型级的适用性。指出在不同的情况下那些典型级较为合用。

本文课题得到科学基金的资助, 工作中得到何咏梅同志的帮助, 均此致谢!

参 考 文 献

[1] Cai R. (蔡睿贤) et al., "Basic Analysis of Counter-Rotating Turbines", ASME Paper 90-GT-108, 1990.
[2] Sotsenko Y. V., "Thermogasdynamic Effects of the Engine Turbines with the Contra-Rotating Rotors", ASME Paper 90-GT-63, 1990.
[3] Louis J. F., "Axial Flow Contra-Rotating Turbines", ASME Paper 85-GT-218, 1985.

TRIPLE COUNTRA-ROTATING TURBINE AND ITS BASIC ANALYSIS

Cai Ruixian

(Institute of Engineering Thermophysics)

Wei Xinglu

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

ABSTRACT

A comprehensive basic analysis for various triple contra-rotating turbines is given with the blade element stage assumption. The appropriate independent variables and evaluation criteria of the triple contra-rotating turbine stages are first presented by analogy with the classical analysis of conventional turbine stages. Then three typical kinds of rotating blade rows are defined and all possible typical schemes of such stages are enumerated. Their characteristics of specific work and load distribution of the triple contra-rotating shafts are presented in a very simple form. The typical triple contra-rotating turbine stages suitable to the three shaft gas turbine power plants are analysed and given. From the analysis results it is concluded that the load capacity per unit engine length of the triple contra-rotating turbines can be much higher than that of the conventional turbines.

OPTIMIZATION OF MULTISTAGE AXIAL-FLOW COMPRESSOR VANE SETTING

Wang Yongming *(Gas Turbine Establishment)*

ABSTRACT

A methodology has been developed for calculating optimum stagger angles of vanes for the axial-flow compressor performance adjustment tests. The methodology uses a square Taylor series as an approximate optimization model, determines initial vane angle changements of the axial-flow compressor tests by means of the compressor performance prediction model and obtains direction and steps for vane adjustment by the digital optimization technology. This methodology has the advantages of fast convergence, less iteration and suitability for the test-data calculation with measuring errors. Compared with the existing methods it can reduce the period and times of compressor performance tests.

AEROENGINE SENSOR FAILURE DETECTION BY BAYESIAN MULTIPLE HYPOTHESIS TESTING

Jian Dazhong and Wang Xiaokui

(Northwestern Polytechnical University)

ABSTRACT

Analytical redundancy of the advanced sensor failure detection isolation and fault sensor output reconstruction obviously enhance the reliability of aircraft engine controls. The Bayesian multiple hypothesis testing is applied to detection isolation and accommodation of the hard failure. The hypothesis conditioned errors, the covariance matrices of the cost function and the optimal estimate are obtained from a bank of Kalman filters. The example using the microcomputer-based simulation indicates that the detective rate, the accuracy of output reconstruction and the detectable minimum range and so on has the advantage over the Kalman filter residual in hard failure.