

某型舰用燃气轮机起动机的选择

周志豪

[提要] 本文试以某型舰用燃气轮机起动机的选择为例,着重叙述如何从发动机起动时的动平衡条件出发,应用均匀加速的原理,估算发动机的需用起动功率以及如何选择满足舰用条件而功率又较为合适的起动机。

关键词: 燃气轮机 起动机选择

一、前言

舰船的机动性,燃气轮机工作的可靠性,与起动系统各部件的工作情况有着极其直接的关系。起动机则是整个起动系统中最为重要的部件。因此,能否按照舰船战术技术要求来选择确定合适的起动机,乃是燃气轮机设计时必须考虑的问题之一。

对于舰用燃气轮机起动机的选择,首先是要用简便可行的方法较为准确地估算出发动机起动的所需功率,其次是确定选择何种类型的起动机,然后是估算起动时间。

二、发动机需用起动功率的估算

1. 起动过程特征转速点的确定

一台新的燃气轮机开始设计时,往往是只有其结构图和一些性能参数,而能够作为

起动系统设计的数据却是不多的。因此,参考现有的同型发动机(母型机)是经常借鉴的方法。

由于某型舰用燃气轮机与401型舰用燃气轮机在结构上不仅相似,而且一些主要性能参数亦颇为接近,所以某型舰用燃气轮机如以401型燃气轮机为参考的母型机,显然是可以这样做的。

现将某型和401型舰用燃气轮机主要性能参数的比较示于表(1)中。

发动机的点火转速($n_{\text{点}}$),第一平衡转速(n_p),起动机的脱开转速($n_{\text{脱}}$)和慢车转速(n_M)是起动过程中的特征转速点。上述特征转速点数值大小的确定,通常是根据现有同型发动机来选取,并取为与设计状态转速 n_H 的比值。

现将现有同型发动机起动过程中各特征转速点统计数值示于表(2)中。

表 1

发动机型别	空气重量流量 G_B 千克/秒	总增压比 π_K^* —	进口总温 T_1^* °K	压气机总效率 η_K^* —	压气机设计转速 n_H 转/分
401	37.6	6	301	0.85	8350
某型	53.4	8.36	300	0.85	8600

表 2

发动机型别	n_m/n_H	n_p/n_H	$n_{o.m.k}/n_H$	$n_{m,r}/n_H$	n_H (转分)
带轴流式压气机的涡喷发动机	0.07—0.12	0.12—0.18	0.2—0.26	0.34—0.40	
涡喷—15	0.15	—	0.40	0.48	8780
401	0.12	—	0.36	0.42	8350

因此,很容易地确定出某型舰用燃气轮机起动过程各特征转速点的数值。现确定:

点火转速 $n_m/n_H = 0.12$ $n_m = 1000$ 转/分
起动机脱离转速 $n_{c.m.k}/n_H = 0.28$ $n_{c.m.k} = 2400$ 转/分

慢车转速 $n_{m,r}/n_H = 0.48$ $n_{m,r} = 4000$ 转/分

2. 燃气发生器阻力力矩的估算

一般地说,燃气发生器阻力矩应是按结构详细计算来得到,但其计算甚为烦琐,为了方便起见,可按下列半经验半理论的公式来估算。其公式为:

$$M_c = cn^2$$

式中 n —燃气发生器转速 (转/分)

c —经验系数

表(3)

n (转/分)	100	300	500	700	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000
n^2	10^4	9×10^4	25×10^4	49×10^4	10^6	2.25×10^6	4×10^6	6.25×10^6	9×10^6	12.25×10^6	16×10^6
M_c (千克米)	9.856×10^{-2}	0.887	2.464	4.856	9.856	22.176	39.424	61.6	88.704	120.736	157.696

3. 发动机高压转子转动惯量的估算

发动机高压转子转动惯量可按下列公式计算,即:

$$J = C' D_k^2$$

其中 D_k —发动机高压转子进口直径

C' —系数

如果已知 J 和 D_k , 则可得到系数 C' 。

401型舰用燃气轮机的资料表明,其转

经验系数 c 又可表达如下: $c = 3.885K$ 。
其中 K 按下式来求取。

$$K = \frac{L_{aH}}{\eta_{KV}} \cdot \frac{G_{BH}}{n^4}$$

$$\therefore L_{aH} = 102.5T_1^* (\pi_{KH}^{0.280} - 1)$$

经计算, $K = 2.537 \times 10^{-6}$ 千克米/(转/分²)

$$\therefore C = 9.856 \times 10^{-6} \text{ 千克米/(转/分)}^2$$

于是,很容易得到燃气发生器阻力矩和转速的关系式

$$M_c = 9.856 \times 10^{-6} n^2$$

根据上述燃气发生器阻力矩估算方法,便可列表并制成燃气发生器阻力矩随转速变化的曲线,即 M_c-n 曲线,如表(3)和图1所示。

动惯量为 $J_{401} = 2.56$ 千克米/秒² (计算结果), 或 $J_{401} = 2.66$ 千克米/秒² (实验结果), 并已知其高压转子进口直径 $D_{K401} = 0.68$ 米, 所以很容易地计算得到系数 $C'_{401} = 18.34$ 。

由于某型和401型舰用燃气轮机高压转子结构大致相似, 所以引用401型舰用燃气轮机得到的系数 C' 来作为计算某型舰用燃

气轮机高压转子转动惯量是可行的。

现在, 已知某型舰用燃气轮机的高压转子进口直径 $D_K = 0.71$ 米, 于是可很便当地计算得到

$$J = 3.3 \text{ 千克米}^2 / \text{秒}^2。$$

4. 发动机需用最大起动功率(N_s)估算

前面已经得到 $M_c - n$ 曲线, 便可应用均匀加速原理计算出发动机需用的最大起动功率。所谓均匀加速原理, 即是假定发动机起动过程的三个阶段的加速力矩是相等的, 可用如下式子来表示:

$$M_j = M_{j1} = M_{j2} = M_{j3}$$

① 确定发动机的加速力矩(M_j)

众所周知, 发动机的加速力矩也可按下式来表示, 即:

$$M_j = \frac{\pi}{30} J \frac{n}{\tau}$$

依据均匀加速原理, 按某型舰用燃气轮机要求起动到慢车的时间不超过90秒, 可按上式进行计算得到

$$M_j = 15.35 \text{ 千克米}$$

② 确定发动机第一平衡转速(n_p)及计算 K_T

发动机第一平衡转速 n_p 可用下式确定, 即:

$$n_p \leq \frac{M_j - 2\Delta M_{TI}}{M_j - \Delta M_{TI}} n_m$$

式中 $\Delta M_{TI} = 9.856$ 千克米

$$\therefore n_p \leq 1390 \text{ 转/分}$$

故取 $n_p = 1300$ 转/分

$$K_T \geq \frac{M_j}{2n_m - n_p}$$

经计算, 可以得到 $K_T = 0.02193$

③ 计算对应发动机需用最大起动功率点的转速(n_{ME})

n_{ME} 可由下式确定:

$$n_{KE} = \frac{M_j + K_T n_p}{2K_T}$$

以 M_j 、 K_T 、 n_p 代入, 可计算得到 ..

$$n_{KE} = 1000 \text{ 转/分}$$

④ 计算 N_s

N_s 可由下式确定:

$$N_s = \frac{[M_j - K_T(n_{ME} - n_p)]n_{ME}}{716.2}$$

以 M_j 、 K_T 、 n_{ME} 、 n_p 代入, 可计算得到

$$N_s = 31 \text{ 马力}$$

⑤ 起动机最大有效起动功率($N_{s\tau}$)的估算

1) 起动机扭矩方程的确定

起动机扭矩按线性规律变化, 其方程为:

$$M = M_0 - bn$$

其中 M_0 、 b 可按下列步骤求取:

引入发动机由起动机带转的最终转速 n_f , 令 $n_f/n_m = a$ 。对现代燃气轮机, 当其起动时间 $\tau = 40 \sim 90$ 秒时, 取 $a = 1.1 \sim 1.5$ 。现取 $a = 1.5$, 则 $n_f/n_m = 1.5$ 。

b 可按下式求取, 即:

$$b = \frac{M_j - C(n_f^2 - n_m^2)}{n_f - n_1}$$

以 M_j 、 C 、 n_f 、 n_m 、 n_1 代入, 可以得到

$$b = 0.00608$$

M_0 可按下式求取, 即:

$$M_0 = n_f(Cn_f + b)$$

以 n_f 、 C 、 b 代入, 可以得到

$$M_0 = 31.3 \text{ 千克米}$$

2) 起动机最大有效起动功率($N_{s\tau}$)的确定

起动机最大有效起动功率可按下式计算, 即:

$$N_{s\tau} = \frac{M_0^2}{2865b}$$

将 M_0 、 b 代入上式, 可以得到

$$N_{s\tau} = 56.2 \text{ 马力}$$

对应的最大有效起动功率点的转速如下式表示, 即:

$$n_m = \frac{M_0}{2b}$$

将 M_0 、 b 代入,可以得到

$$n_M = 2574 \text{ 转/分}$$

起动机空载($M_{s\tau} = 0$)时的转速(n_{s0})

可按下式计算,即:

$$n_{s0} = \frac{M_0}{b}$$

将 M_0 、 b 代入,可以得到

$$n_{s0} = 5148 \text{ 转/分}.$$

三、发动机起动阶段的

加速时间的确定

1. 起动第一阶段时间(τ_1)的估算

这里引入通用的动态带转参数 θ 的概念。通常, $\theta = f(\bar{m}, a)$ 。其中参数 $\bar{m} =$

$$\frac{M_0}{M_{ck}}, \quad a = \frac{n_f}{n_p}.$$

起动第一阶段的加速时间(τ_1)如下式表示,即:

$$\tau_1 = \frac{\theta J}{C n_f}$$

$$\text{式中, } \theta = \frac{\pi}{30} \frac{1}{m+1} \ln \frac{a+1}{a-1} \frac{m}{a-1}$$

M_{ck} 为最终带转转速点上的发动机阻力矩(千克米)。因此,从 M_c-n 曲线上可以查出

$$M_{ck} = 2.4 \text{ 千克米}$$

经计算便可得出 $\bar{m} = 1.3$

以 $\bar{m} = 1.3$ 、 $a = 1.5$ 代入 θ 式,便可容易地计算得到:

$$\theta = 0.0688$$

于是,可以计算得

$$\tau_1 = 15.36 \text{ 秒}$$

2. 起动机脱开时间(τ_{ik})的估算

$$\tau_{ik} = 0.241 \frac{J}{b} \lg \frac{M_0}{M_0 - b n_{ik}}$$

经计算,得到:

$$\tau_{ik} = 35.7 \text{ 秒}$$

四、起动机选择

随着起动机的发展,其类型亦日趋增多。现有电起动机、燃气涡轮起动机、液压起动机、空气涡轮起动机、火药涡轮起动机等等。其中,电起动机用得普遍,如401型舰用燃气轮机用的就是电起动机,这种起动机具有一定的使用经验,但它的每一马力起动机重量较大,因而使用范围受到限制;火药起动机,因其安全可靠差,药柱贮存运输均有问题,所以也不宜舰用;液压起动机本身结构简单,工作可靠,液压马达体积小,但其供油系统要求严格,且庞大,噪音厉害;燃气涡轮起动机固然有功率大、具有“自起动”能力方面的优点,但它的燃料却是汽油,用到舰船上就存在安全问题,势必导致舰船防火等级的提高以及备载第二种燃料等麻烦,将影响舰船的可靠性。所以,对于舰用燃气轮机采用带供气设备的空气涡轮起动机是极其合适的。空气涡轮起动机扭矩大,功率大,重量尺寸小,而且控制也较简便。

那么,选择何种型号的空气涡轮起动机为好呢?根据对国内生产该种类型起动机厂家的调研,当时唯有KJ-20及KJ-40两种起动机。其中,KJ-40起动机是高、低压空气涡轮起动机。考虑舰上只有高压气源特定条件,采用高压气借助该种起动机来起动第一台发动机,另一台发动机就可以用已工作的第一台发动机的压气机抽气引入该种起动机来低压起动。这是起动舰用燃气轮机的理想方案。

可是,KJ-40空气涡轮起动机能否用来作为某型舰用燃气轮机的起动机呢?根据前述的发动机需用起动功率的估算结果分析,选用的空气涡轮起动机参数应满足下列

要求：起动机的最大有效起动功率须在56.2马力以上，脱开转速约在2400转/分，脱开时间约35.7秒，扭矩特性如下式： $M_{CT} = 31.3 - 0.00608n$ ，起动机初始扭矩至少为31.3千克米。核查KJ—40起动机，其功率、扭矩特性、脱开转速、脱开时间大致与上述要求接近。因此，完全可以确定以KJ—40空气涡轮起动机作为某型舰用燃气轮机的起动装置。后来的实践表明，选择的KJ—40空气涡轮起动机是令人满意的，足以保证某型舰用燃气轮机的起动成功。

五、结 论

1. 试验实践表明，新机设计时应用上述方法及步骤来确定发动机需用多大功率的起动机是可行的，得到的结果也是可信的。试车表明，估算的某型舰用燃气轮机起动过程第一及第二阶段的加速时间与试验结果基本接近。例如，第一阶段时间估算是15秒，而实验得到的是10秒；估算的起动机断开时间是35秒，而实验得到的是30秒。这里须指出，在估算时并未考虑到发动机压气机导叶可能有利起动的因素。因此，估算的结果能

与试验结果吻合起来。

2. 这种估算方法优点在于刚开始设计阶段就可通过它来作出予计，为选择起动机提供依据。方法虽然概略，但很容易计算，需要具备的初始条件或参数（数据）不多，是作方案论证的有力手段。尤其是对发动机阻力矩的估算和对发动机高压转子转动惯量的估算的方法是很有效的，具有一定的实用价值。

3. 舰用燃气轮机起动机选择的原则和思路，对于舰用燃气轮机的设计工作无疑是极有帮助的。

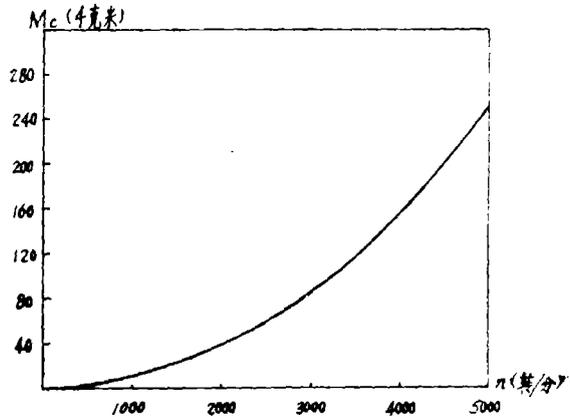


图1 燃气发生器阻力矩随转速变化的曲线

(上接59页)

流任何给定分布型下在冷却水外部射流雾化范围中空气和粒子性质的局部变化。对于计算射流与空气流或其它射流的相互关系，该模型不需要任何经验关系式，而模型中心经验关系，首先是建立当地的热量交换和质量交换系数的关系分程，其次是蒸汽空气混合物的紊流度模型。文章指出，早先推荐的基本模型能用来实现射流喷嘴结构参数的最佳化，这样的喷嘴能大大提高冷却效果。模型的正确性通过试验得到了证实。图6 参16 (苏承元)

JOURNAL OF ENGINEERING FOR THERMAL ENERGY AND POWER

No. 4 1986

CONTENTS

1. Li Genshen took part in an oral examination session prior to conferring a master's degree on postgraduates *editorial department* (1)

GAS UTRBINE

2. Dual working fluid parallel-compound cycle engine(Chen's cycle)
..... *Wen Wueyou* (2)

Synopsis

Dual working fluid parallel-compound cycle engine is a relatively new type of thermal engine which is characterized by a high efficiency and enhanced specific power. This paper gives a general review of this cycle, covering such aspects as cycle principle, features and analysis, comparison between cycles, and their application examples.

2. The effect of the movement, eccentricity and deformation of compressor adjustable guide vanes on guide vane setting angles
..... *Zhang Chunlin* (7)

Synopsis

This paper presents a theoretical analysis of the setting angle deviation of adjustable guide vanes. The relationship between the setting angle deviation on the one hand and the adjustable guide vane systems structural dimension and component rigidity on the other hand has been discussed. An equation for calculating setting angle deviation is deduced, and the calculated results are compared with measured ones.

4. Optimization for rotor blades of tandem design for axial flow compressors
..... (13)
5. Selection of startors for marine gas turbines..... *Zhou Zhihao* (18)

Synopsis

Taking the selection of a startor for a certain type of naval gas turbine as an example, this paper focuses on a method for evaluating the required engine start power by using uniform acceleration principle with the dynamic balance condition during engine start-up serving as a calculation basis. The selection of startors which can meet marine use requirements and also

have a relatively adequate power is also discussed in this paper.

6. Advanced inlet-air treatment improves gas-turbine performance (23)
7. Effects of Tip Endwall contouring on the Three-Dimensional Flow Field in an Annular Turbine Nozzle Guide Vane; Part I—Experimental Investigation (27)

STEAM TURBINE

8. The characteristic features of a thermal nuclear steam turbine regulation system and an exploratory investigation of a technical solution *Zhao Yongpo* (31)

Synopsis

This paper describes the design features of a thermal nuclear saturated steam turbine regulation system on the basis of the author's practical experience. Such features include, for example, the use of throttle regulation for high pressure cylinder inlet steam to minimize pressure loss, the prevention of excessive speed after load rejection, and load adjustment patterns, etc. In addition, concrete versions for their attainment are discussed.

9. Condenser vibration analysis by microcomputer (36)

BOILER

10. Initial experience with the hard coal-fired slag tap furnace of the 300MW unit at Elektromark's Elverlingsen power station (41)

ENVIRONMENTAL PROTECTION EQUIPMENT

11. A silencer for the single can-type combustion chamber test bed of a gas turbine (48)

Synopsis

The noise attenuation relating to the testing of a gas turbine single can-type combustion chamber (high gas temperature of 1000°C, high pressure of 6 kg/cm² and high noise level of 123 dB(A)) has been successfully attained by a silencer proposed by the author. The noise reduction has been estimated at 55 dB (A). In addition, the technical problem of exhaust gas sampling for analysis has also been solved.

PRODUCTS

12. Sealed rotary joint *Dei Peiming, Li Jinling* (52)

ABSTRACTS

13. Maintenance experience of industrial steam turbines (53)
Power plant spray cooling; design and performance studies (53)