

# 双轴燃气轮机的变工况性能

赵士杭 胡自勤 向文国 张英健

(清华大学)

〔提要〕 本文通过变工况计算,得到了2/LL系列和2/HH系列双轴燃气轮机的性能曲线,在此基础上对它们的变工况性能进行了分析。最后指出,这些燃气轮机中的几种方案,今后在联合循环电站中将得到一定的应用和发展。

主题词 燃气轮机 性能分析 热力学循环

## 一、前言

早在40~50年代,人们就指出可实用的双轴燃气轮机是平行双轴。它们有两种系列,一种是低压轴输出功率的2/LL系列,一种是高压轴输出功率的2/HH系列,图1所示的是它们中

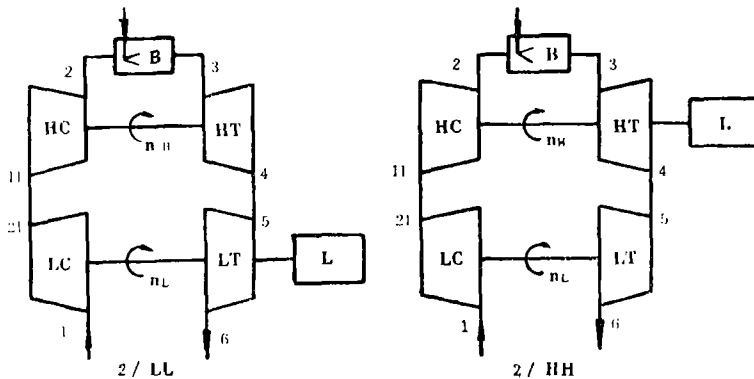


图1 双轴燃气轮机

简单循环的方案。当采用间冷(I)、回热(R)后,就成为多种方案。当时人们通过变工况性能分析,认为2/LL系列可作为船舶推进动力,2/HH系列可用于电站发电。

限于当时的水平,燃气初温仅600~700℃,双轴燃气轮机的总压比约9~16。目前燃气初温已提高到1000℃以上,双转子压气机的总压比达20左右或更高。在此情况下,燃气轮机的性能可能有一定变化,且当时对图1所示的简单循环方案未予详细分析,有必要重新进行讨论。本文分析的双轴燃气轮机,部分设计参数为: $t_3 = 1050^\circ\text{C}$ ,  $\pi_{\text{总}} = 29$ ,  $N_e = 30\,000\text{kW}$ ,其变工况计算是在压气机和透平性能曲线的基础上进行的,计算方法见[1]。

## 二、变工况性能

### 1. 简单循环时的性能

图2是两种燃气轮机的性能曲线网。从图看出,两种机组的运行范围受低压压气机喘振边

界的限制,使2/LL带动恒速负载和2/HH带动螺旋桨负载时都不能在低工况下运行。当2/LL带动螺旋桨负载和2/HH带动恒速负载时,在宽广的工况变化范围内都能运行,只是2/LL带动螺旋桨的在低负荷下运行线靠近喘振边界,可能要采取防喘振措施。

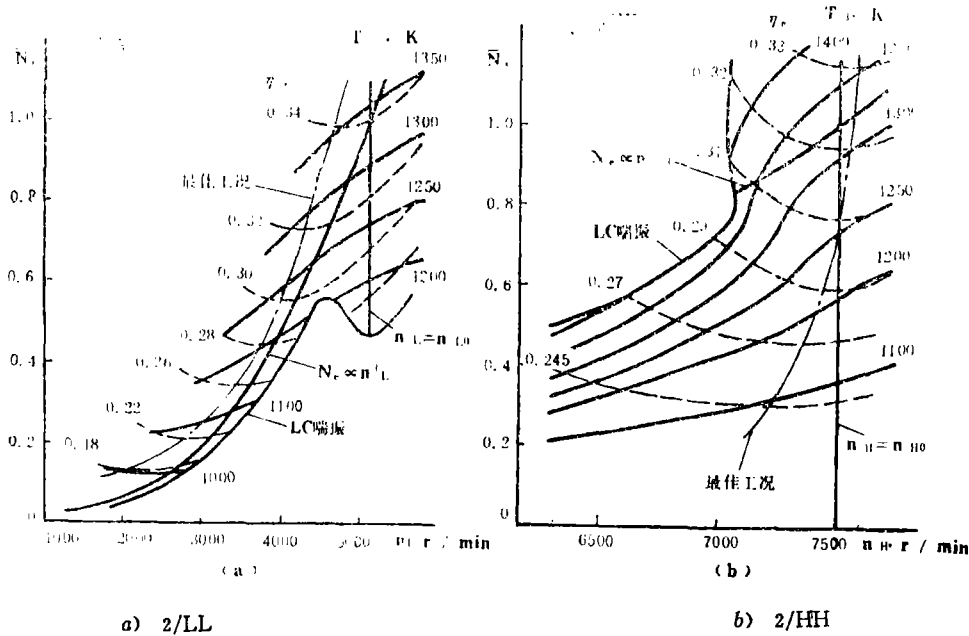


图 2 简单循环时的性能曲线网

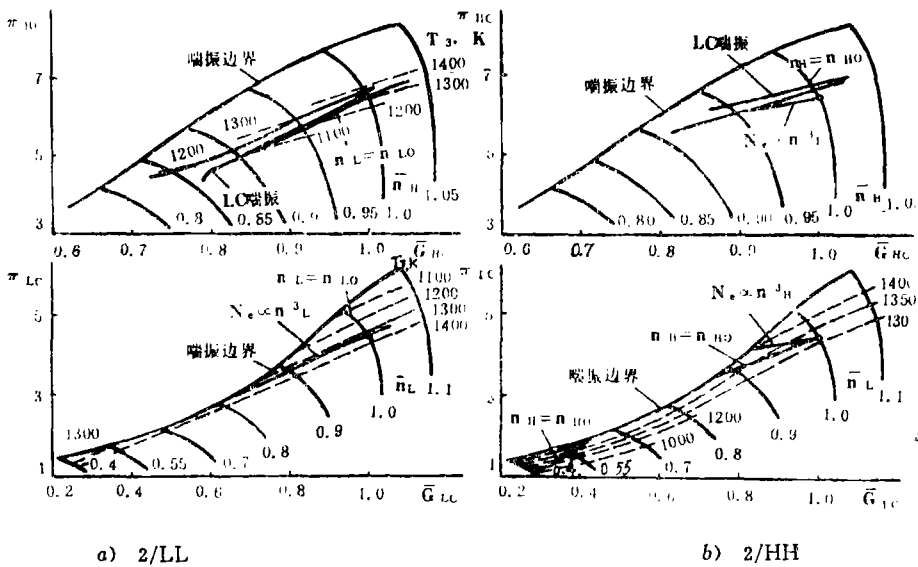


图 3 简单循环时的等T<sub>3</sub>线和平衡运行线

图3是两种燃气轮机表达在压气机性能曲线上的等T<sub>3</sub>线等。图中除2/HH的低压压气机中等T<sub>3</sub>线是温度高的在上面、温度低的在下面外,其余的都是温度高的在下面、温度低的在上面。负荷降低时,机组平衡运行线的走向:带动螺旋桨负载时,两种机组的高压压气机和低压压气机的折合转速都不断减小;带动恒速负载时,2/LL低压压气机中沿n<sub>LO</sub>线向上移动,

很快进入喘振工况, 2/HH高压压气机中, 因进口空气温度降低使折合转速不断增加。

### 2. 有间冷时的性能

图4是两种燃气轮机的性能曲线网。与图2相比较, 低压压气机的喘振边界有较大的移动, 结果是明显地缩小了燃气轮机的运行范围。2/LL/I带动螺旋桨负载的负荷降至65%时低压压气机就喘振了, 2/HH/I带动恒速负载时, 中间一假负荷范围因低压压气机喘振而不能运行。显然, 这是由于间冷加剧了压气机的工作不协调现象所致。但在早期的文献[2]、[3]中, 都认为2/LL/I可用于船舶推进, 2/HH/I可用于发电。究其原因当时的压气机压比较低, 喘振边界在高转速范围变化较平坦, 而压比高的压气机, 在高转速范围的喘振边界变陡, 使喘振边界中段向右下方凹进去, 因间冷加剧了工作不协调现象后就形成图4所示的状况。

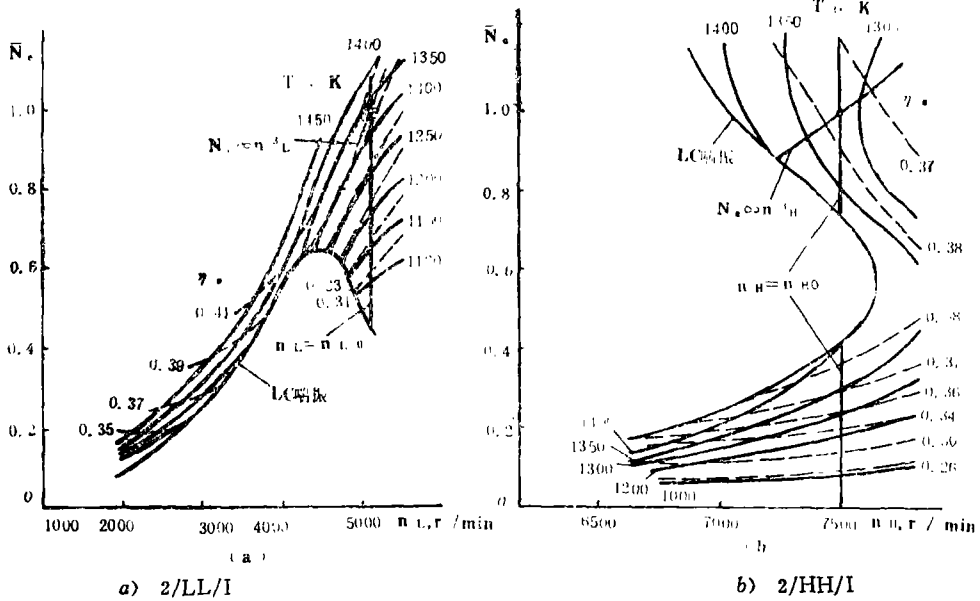


图4 间冷循环时的性能曲线网

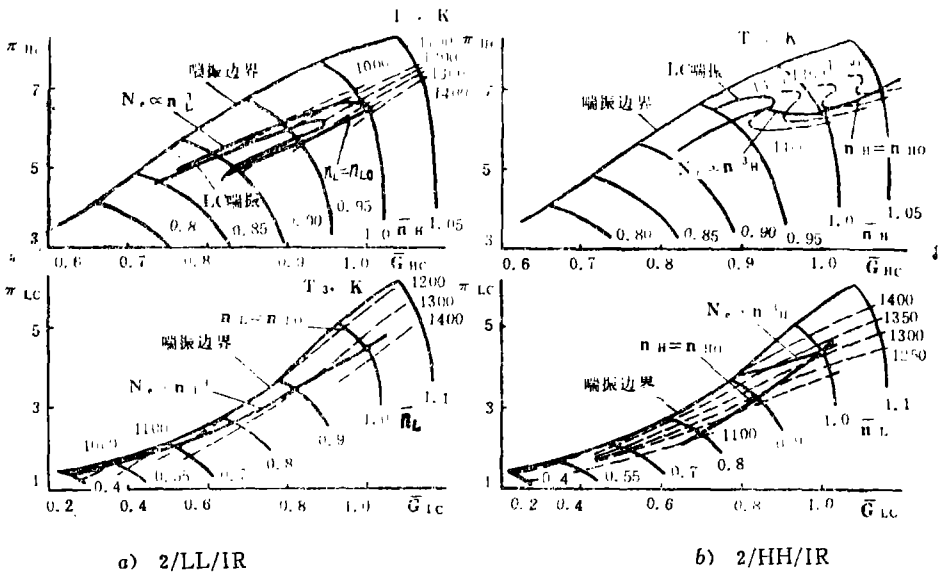


图5 间冷循环时的等T<sub>3</sub>线和平衡运行线

图5是两种燃气轮机表达在压气机性能曲线上的等 $T_3$ 线等。与图3相比较, 2/LL/I 高压压气机中的等 $T_3$ 线倒了过来, 温度高的在上面, 温度低的在下面。2/HH/I高压压气机中的等 $T_3$ 线由于相交重叠, 故未画在图上。机组的平衡运行线, 由于间冷器出口空气温度视为不变, 故2/HH/I在带动恒速负载时折合转速不变, 即沿 $\overline{n_{H0}}$ 线运行。

### 3. 有间冷回热时的性能

图6是两种燃气轮机的性能曲线网。与图4相比较, 等 $T_3$ 线和低压压气机喘振边界对运行

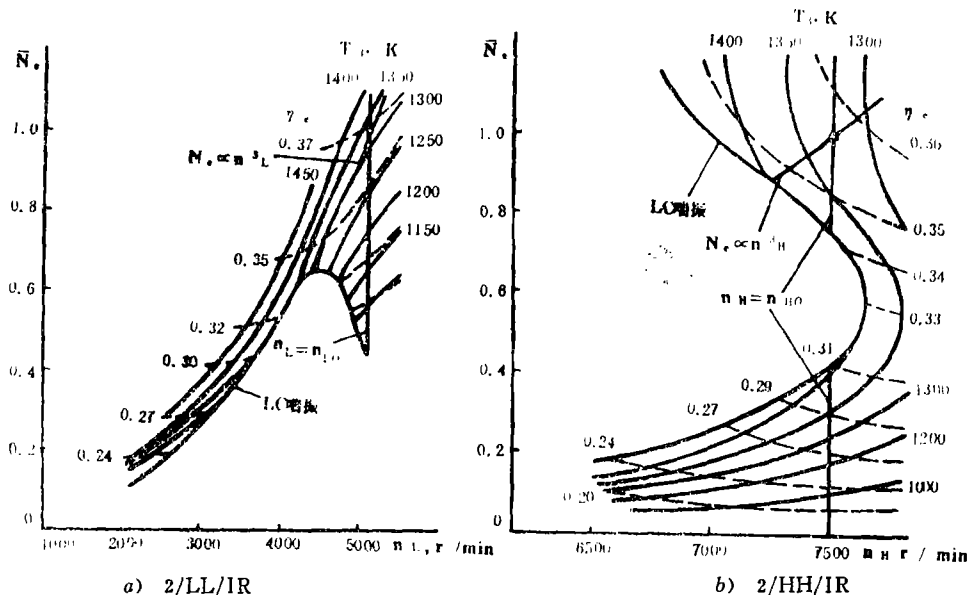


图 6 间冷回热循环的性能曲线网

范围的限制情况基本相同, 仅等效率线不同, 主要是部分负荷下效率较高(原因后述)。至于在压气机性能曲线上的等 $T_3$ 线和平衡运行线, 与图5所示有间冷的基本相同。不另画。

### 三、性能比较

从燃气轮机的运行范围来说, 简单循环的较宽广, 用间冷后则明显缩小。机组效率的变化, 从图7所示带动具体负载时的情况可看出, 简单循环的最低, 间冷循环的次之, 间冷回热循环的最高, 且在部分负荷下间冷回热循环的效率获得更多的改善。原因是间冷回热循环在部分负荷下 $T_3$ 温度升高, 使排气温度 $T_6$ 显著升高, 回热器中传热温差增大, 单位工质回收的热量增多, 机组效率得到改善。

但是,  $T_3$ 超过 $T_{30}$ 和 $T_6$ 超过 $T_{60}$ 的情况, 在燃气轮机设计时应予以很好考虑。为使透平叶片等热部件能在 $T_3 > T_{30}$ 的情况下安全运行, 设计时需降低 $T_{30}$ , 从而降低了机组设计工况的效率。计算表明, 2/HE/I的 $T_{3max}$ 大于 $T_{30}$ 约80K,  $T_{6max}$ 大于 $T_{60}$ 约200K, 如此大的超温显然是我们所不希望的。

因此, 我们应设法改善间冷循环和间冷回热循环方案的性能。有效的措施是在低压压气机中采用可调静叶, 扩大其运行范围, 最终使性能曲线网中的LC喘振线变得与图2所以的相似, 使2/LL/I和2/LL/IR能用于船舶推进, 2/HH/IR和2/HH/IR能用于发电。上述措施还能消除在部分负荷下 $T_3$ 超温的现象。

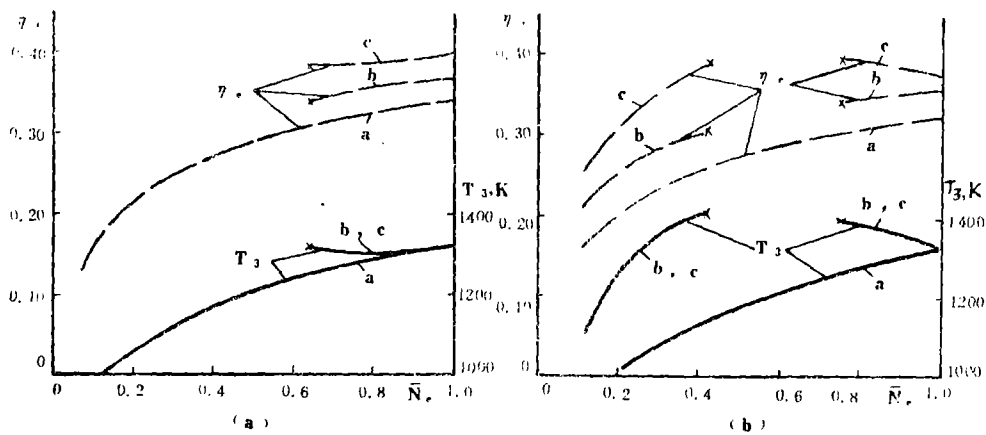


图7 燃气轮机带动具体负载时的性能

a) 2/LL 系列带动螺旋桨负载, X-LC喘振 a-2/LL b-2/LL/I c-2/LL/IR  
 b) 2/HH 系列带动恒速负载 X-LC喘振 a-2/HH b-2/HH/I c-2/HH/IR

### 四、展 望

从上面的分析知, 2/LL系列的性能仍可用作船舶推进动力。但目前世界上却不生产这类燃气轮机。原因是从安全稳定运行与起动机性能等方面来看, 它不如目前舰船中广泛应用的分轴和三轴燃气轮机, 且它们一般是从性能好的航机改型得到, 机组效率高、体积小、重量轻。近几年, 为了提高设计工况和改善部分负荷下的效率, 采用间冷和回热循环的三轴燃气轮机正在发展中, 其效率变化与图7中的2/HH/IR类似, 但它能避免低压压气机喘振的问题(即效率变化曲线连续), 估计不久将可实用。因此, 可预料今后2/LL系列是不会用作舰船推进动力的。

大家知道, 为了提高发电效率正在大力发展联合循环电站。在这类电站中, 应用在部分负荷下排气温度变化不大或有所升高的燃气轮机可有效地改善在部分负荷时的发电效率。2/HH和2/HH/I燃气轮机正符合该条件, 受到了人们的重视。例如70年代美国CW公司提出的发电用1000MW煤气化联合循环方案中, 燃气轮机是2/HH方案<sup>[4]</sup>。近几年, 瑞典和瑞士联营的ABB公司, 正在发展发电用增压流化床燃煤的联合循环, 燃气轮机是2/HH/I方案, 其低压压气机采用可调进口导叶, 目前该机组即将投入试运行<sup>[5]</sup>。顺便指出, 有再热的双轴燃气轮机, 由于排气温度高, 用于联合循环时可达到的效率, 因而可得到一定的发展。

由于联合循环对效率的提高明显高于采用回热的燃气轮机, 因而在电站中有回热的双轴燃气轮机将不会被应用。

由上可见, 在今后的一段时间内, 2/HH、2/HH/I和有再热的双轴燃气轮机, 在联合循环电站中将得到一定的发展。

### 参 考 文 献

[1] 赵士抗. 燃气轮机原理(下册). 清华大学热能系讲义, 1985  
 [2] Malinson D H, Lewis W G E. The Part-load Performance of Various Gas-turbine Engine Schemes. The Institution of Mechanical Engineers, 1948, 159  
 [3] Котляр Н В. Переменные Работы Газотурбинных Установок. МАШИГИЗ, 1961  
 [4] 美国 CW 公司动力工程部来华技术座谈小结, 1977  
 [5] Eric Jeffs. Gas turbine PFBC to repower steam plants in US and Spain. Gas Turbine world, 1987, 17 (3)

used for the reconstruction and design of the transmission system.

*Key words:* variable transmission drive, energy-saving, electromagnetic clutch, design improvement

**4. Research and design of a lignite-firing reciprocating grate furnaces**  
..... *Wang Yongdong* (21)

*Abstract*

In order to open up a new realm for the utilization of lignite, the author has designed a double drum, natural circulation water-tube boiler with economizer, air preheater and transversely positioned reciprocating grate bars. With a thermal efficiency of the boiler as high as 76.80%, significant social and economic benefits can be attained.

*Key words:* boiler, design

**5. The design of a gas turbine waste heat boiler**..... *Wu Yishan* (25)

**6. The off-design performance of two shaft gas turbines**  
..... *Zhao Shihang Hu Ziqin*  
*Xiang Wenguo Zhang Yingjian* (29)

*Abstract*

In this paper the performance maps of 2/LL and 2/HH two shaft gas turbine series are obtained by way of calculating the off-design performance. On this basis, the off-design performance of these gas turbines is analyzed. In conclusion, the paper pointed out that some types of these gas turbines might have potential for development in and application to combined cycle power stations.

*Key Words:* gas turbines, properties, thermodynamic cycle, analysis

**7. Elimination of the connecting screw failure of the power turbine load-bearing casing and load-bearing analysis**..... *Wang Gouhua* (34)

*Abstract*

In connection with the analysis and elimination of a gas turbine power turbine joint screw head failure, the author suggests that some structural parts in the engine should be given a checkout with respect to their fatigue strength. She also stresses the importance of the dynamic balance of the rotor as a whole.

*Key words:* turbine fastener, rupture, analysis

**8. Introduction of Ingersoll-Rand Compad and its Products**  
..... *Guan Huaming* (39)

**9. Some problems concerning air intake tests of the MGT-1 gas turbine land-based parallel running test rig**..... *Qian Zhenyue* (41)

*Abstract*

Some appraisal data were obtained from tests of various versions of intake ducts on a land-based parallel running test rig. This paper sorts out and analyzes a variety of problems, such as the effect of different air intake louver arrange-