

# 三轴燃气轮机发电机组突变负载控制策略研究

张亚东,姜里运,宋少华,欧永钢

(中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计研究所 辽宁 沈阳 110015)

**摘要:** 基于整机试验与仿真,对三轴燃气轮机发电机组突变负载控制策略进行了研究。试验结果表明,改进后的功率前馈加燃气发生器转速串级PID闭环控制方案具有响应速度快、抗干扰能力强和自适应性好的特点,可满足瞬态发电要求。当突增40%负载时,动力涡轮转速下降值不大于4%,恢复时间不超过2s;仿真结果表明,甩负荷时提前打开低压压气机出口放气阀放气不仅改善了压气机工作裕度,还可以抑制动力涡轮转速的增长,当放气25%时动力涡轮转速超调量与不放气相比下降3%,恢复时间减少10s。

**关键词:** 突变负载;控制策略;串级;前馈;试验与仿真

中图分类号:U664.131 文献标识码:A

## 符号说明

- $n$ —转速, r/min
- $T$ —温度, °C
- $W_f$ —燃油流量, kg/s
- $p$ —压力, Pa
- $I$ —电流, A
- $SM_{cl}$ —低压压气机喘振裕度, %
- 角标
- 1—环境状态
- g1—低压转子
- g2—高压转子
- c—换算状态
- p—动力涡轮
- 3—高压压气机出口
- 48—低压涡轮出口
- 5—动力涡轮出口
- dot—变化率
- d—控制给定
- max—最大
- min—最小

DOI:10.16146/j.cnki.rndjgc.2016.11.005

## 引言

随着社会的发展,燃气轮机在应急电源、机械驱动和船舶电力推进等领域被广泛应用<sup>[1~3]</sup>。燃气轮机作为动力驱动或推进装置,常用的控制规律有等

功率控制和等转速控制<sup>[4]</sup>,当作为原动机用于船舶电力推进或备用电源时,负载为发电机组,一般采用等动力涡轮转速控制<sup>[5]</sup>。采用动力涡轮转速单回路PID控制方案,结构简单、容易实现,在涡轴发动机机械液压控制系统中曾广泛采用<sup>[6]</sup>,但其抗干扰能力较弱,对扰动响应慢。而燃气发生器涡轮转速控制却可以较快速地响应扰动,若将动力涡轮转速控制回路与燃气发生器涡轮转速控制回路组合为串级控制方案,则可及时抑制内侧回路扰动,而又不对外侧回路造成较大影响,从而避免单回路控制方式的不足。研究表明,进行发电用燃气轮机控制系统设计时,充分利用燃气发生器转速串级控制的特点,可获得比单回路控制系统更高的控制质量<sup>[7~8]</sup>。

燃气轮机用于孤网发电时,负荷变化频繁,表现形式为阶跃性突变,对燃气轮机和调速器的动态性能有很高要求。当电负载功率大幅度变化,特别是发生甩负荷时,动力涡轮突然空载,若燃油调节速度较慢,必然会发生超转速停车<sup>[9]</sup>,而若燃油调节速度过快,又可能引起低压压气机喘振或燃烧室熄火<sup>[10]</sup>。显然常规的控制方案得到的突变负载动态性能将不够理想,这就对控制方式提出了新的要求。针对上述问题,有必要结合整机试验与仿真,开展三轴燃气轮机发电机组突变负载控制策略研究。

## 1 控制方案及控制规律

### 1.1 控制方案

研究表明控制系统除了控制回路外还应包括参数限制回路<sup>[11~12]</sup>。本研究根据燃气轮机发电机组突变负载控制目标及参数限制规律,制定了具体的控制方案,包含控制子系统和参数限制子系统。其中控制子系统包含 $n_p$ 、 $n_{g2c}$ 、 $n_{g2dot}$ 、 $W_f$ 和功率-转速前馈5个调节回路;参数限制子系统包含 $n_{g1max}$ 、

收稿日期:2016-01-15; 修订日期:2016-02-29

作者简介:张亚东(1983-),男,江苏灌云人,中国航空工业集团公司工程师。

$n_{g2max}$ 、 $n_{pmax}$ 、 $n_{g1cmax}$ 、 $n_{g2cmax}$ 、 $T_{48max}$ 、 $W_{fmax}$ 、 $W_{fmin}$ 、加速时的加速率  $(dn_{g2c}/dt)_{ac}$  和油气比  $(W_f/P_3)_{ac}$ 、减速时的减速率  $(dn_{g2c}/dt)_{dec}$  和油气比  $(W_f/P_3)_{dec}$  的限制。燃气轮机控制方案原理图如图 1 所示,首先,由控制子系统中的  $n_p$  控制回路或电流  $I$  (转变为功率) 前馈回路确定外回路的控制信号,即燃气发生器涡轮转速的给定,再将该给定值与各转速和

温度限制回路的输出经过低选,确定出  $n_{g2c}$  的给定即内回路的输入;然后,再由  $n_{g2c}$  调节回路或  $n_{g2dot}$  调节回路计算出燃油控制信号,再将该信号与燃油流量、油气比和转速变化率限制回路的输出经高选或低选,确定出燃油给定量;最后,通过燃油调节回路控制电液伺服阀供油量大小。

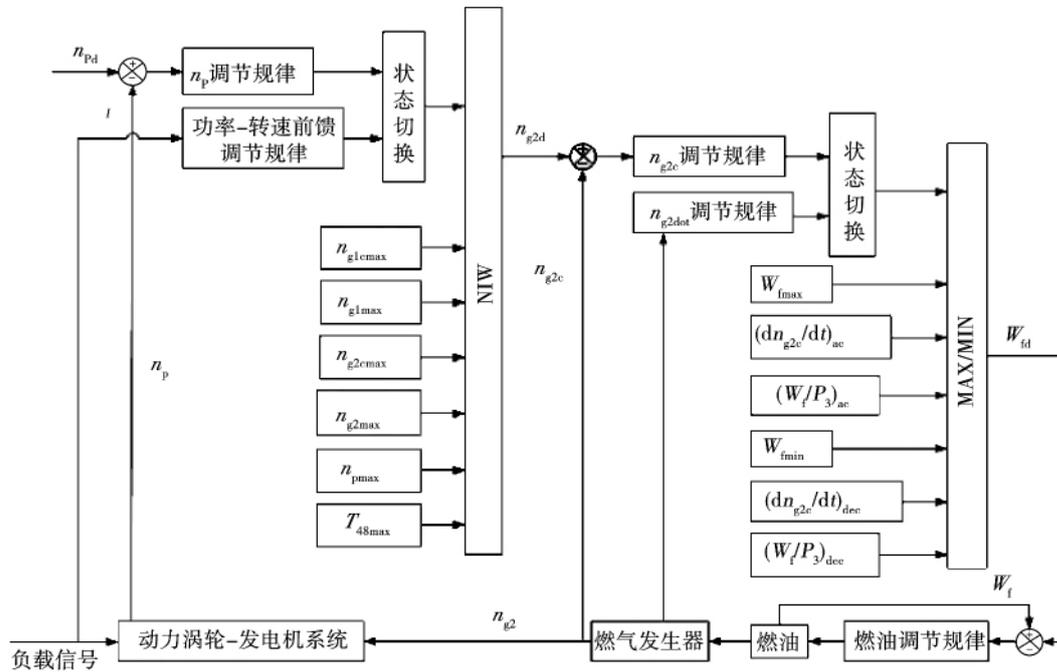


图 1 三轴燃气轮机数字控制方案原理图

Fig. 1 Schematic diagram of a digital control version for a three-shaft gas turbine

本文采用了多回路变系数的 PID 控制方案,各模块之间通过转速变化或负载功率变化率来切换控制规律。

1.2 控制规律

发电机组达到发电转速后,当负载信号及控制

指令保持不变时,燃气轮机将处于稳定状态运行,动力涡轮转速按闭环控制,同时以燃气发生器涡轮转速和燃油供油量的闭环控制为内环,稳态过程燃气发生器转速串级控制原理如图 2 所示。

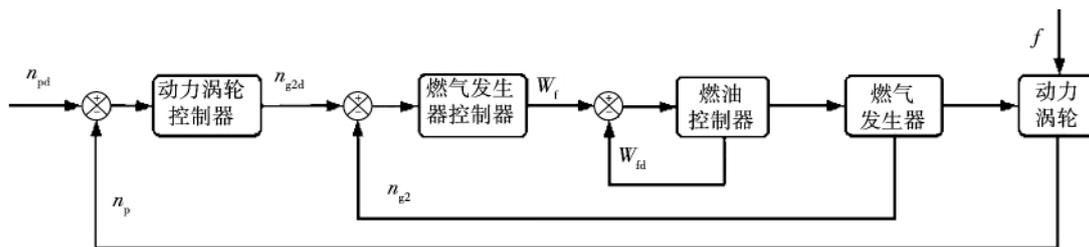


图 2 稳态过程串级控制系统结构图

Fig. 2 Chart showing the structure of a steady-state process cascade control system

加减负载时动力涡轮转速将快速偏离发电工作转速,此时若仍选上述稳态控制规律,将影响瞬态发电品质。文献[13]在制定涡轴发动机加减速控制规律时,在稳态控制回路的基础上增加了加减速控制模块,该模块采用动力涡轮转速控制回路与燃气发生器涡轮转速变化率控制回路组成串级控制,如图3所示。在加减速过程中,根据动力涡轮转速变化范围,使稳态控制回路与加减速控制回路交替获得控制权限,具体控制规律为:

$$W_f = \begin{cases} f_1(n_{g2})(n_{p1} \leq n_p \leq n_{p2}) \\ f_2(n_{g2dot})(n_p \leq n_{p1} \text{ 或 } n_{p2} \leq n_p) \end{cases} \quad (1)$$

然而由于发电负载的变化速度很快,负载轴系两端的功瞬间将不平衡,若以动力涡轮转速变化分

段交替切换稳态控制回路与加减负载控制回路将带来一定的控制延迟,增加动力涡轮转速下垂量或超调量。本文制定加减负载控制规律时,在稳态控制回路的基础上增加功率-燃气发生器转速前馈控制模块,如图4所示。当正常突增和突减负载时,按图5的突变负载控制逻辑进行调节。

为能够及时预判机组在高工况甩负荷,引入了负载断路器开关信号,当在某一转速以上发生甩负荷时,控制系统将快速向同步慢车转速调节,并提前打开低压压气机出口放气阀,当动力涡轮转速接近目标转速时,将提前退出甩负荷状态调节,转为稳态燃气发生器转速串级控制。甩负荷控制逻辑如图6所示。

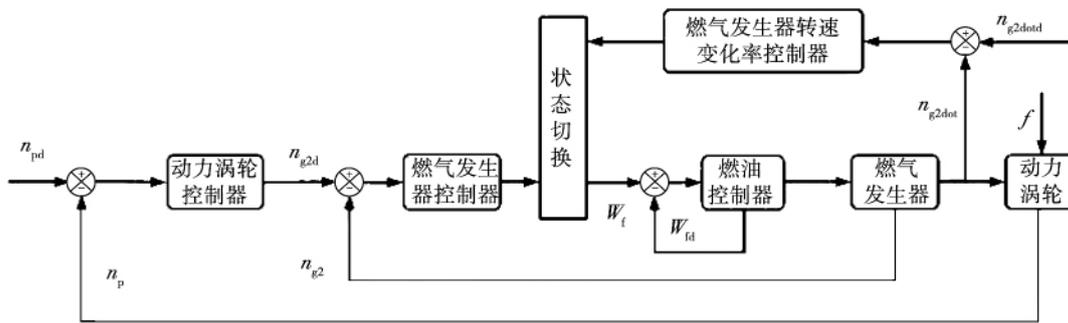


图3 突变负载串级控制系统结构图

Fig. 3 Chart showing the structure of an abrupt-changed load cascade control system

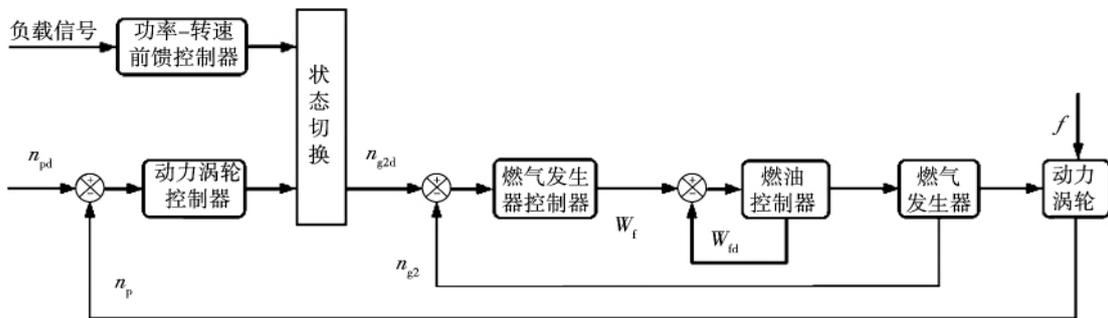


图4 突变负载前馈与串级控制系统结构图

Fig. 4 Chart showing the structure of an abrupt-changed load forward feed + cascade control system

## 2 试验与仿真结果分析

发电机组试验部件主要由燃气轮机、减速器、发电机、变压器和电阻负载组成。在突变负载调试试

验中分别对上述燃气发生器转速串级PID闭环控制、基于转速变化率加燃气发生器转速串级PID闭环控制和基于功率前馈加燃气发生器转速串级PID闭环控制方式进行研究。为比较3种控制方式调节品质,均取第5s时电阻负载发生了突增,最终得到

的参数调节结果如图 7 和表 1 所示。可以看出,当负载从 25% 额定工况突加至 65% 额定工况时,采用基于功率前馈加燃气发生器转速串级 PID 闭环控制时,动力涡轮转速下垂量最小,恢复时间最短,满足瞬态发电时动力涡轮转速下垂量不大于 4%,恢复时间不大于 3 s 的要求;而采用基于转速变化率加燃气发生器转速串级 PID 闭环控制虽然动力涡轮转速下垂量比燃气发生器转速串级 PID 闭环控制的低,但这两种控制方式的恢复时间都较长;在加速初始阶段,燃油增速率从大到小依次为:基于功率前馈加燃气发生器转速串级 PID 闭环控制、基于转速变化率加燃气发生器转速串级 PID 闭环控制和燃气发生器转速串级 PID 控制,同样燃气发生器涡轮转速、低压涡轮出口温度上升速度也按此顺序变化;在中间阶段,前两种控制方式的燃油和排气温度的最大值基本一致,而第 3 种控制方式的转速调节最慢,因此其瞬态最大燃油量和排气温度也低于前两种控制方式。

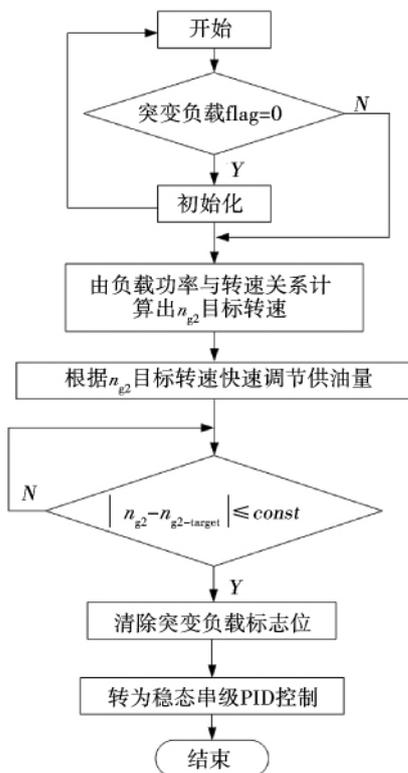


图 5 加前馈的突变负载控制逻辑  
Fig. 5 Abrupt-changed load control logic plus a forward feed

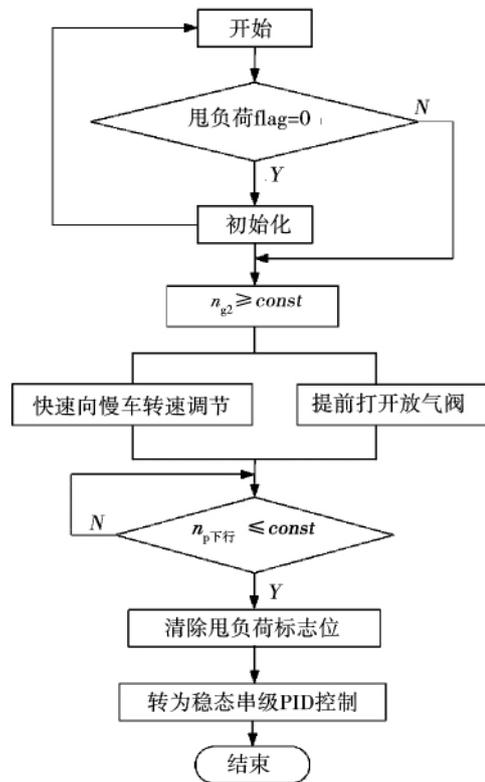


图 6 甩负荷控制逻辑

Fig. 6 Load rejection control logic

表 1 不同控制规律下的动力涡轮转速的调节时间和下垂量

Tab. 1 Rotating speed regulation time and droop of the power turbine in various control regularities

参 数	前馈 + 串级 PID	转速变化率 + 串级 PID	串级 PID
下垂量/%	3.5	7.1	9.9
恢复时间/s	1.7	8.8	8.2

试验研究还发现,采用基于转速变化率加燃气发生器转速串级 PID 闭环控制时,容易发生转速振荡不稳或经几个振荡周期后趋于稳定,而功率前馈加燃气发生器转速串级 PID 闭环控制由于是根据突变负载后负载功率与燃气发生器涡轮转速的对应关系计算出目标转速,并进行速率闭环调节,当接近目标转速时,则提前退出速率闭环控制,转入燃气发生器转速串级 PID 闭环控制,因此不会发生因动力涡轮转速变化交替切换闭环方式导致转速振荡不稳的问题。

由于突减负载时 3 种控制方式的调节品质与上述突增负载基本一致,限于篇幅不作详细说明。

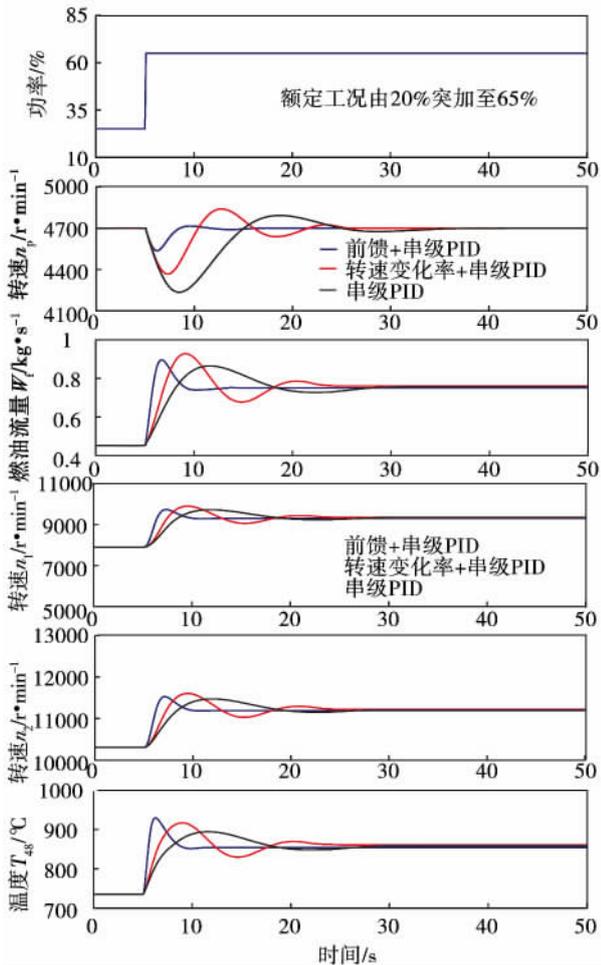


图 7 不同控制规律结果比较

Fig. 7 Comparison of the results in various control regularities

考虑到直接在机组上进行甩负荷试验存在一定的技术风险,本文利用 GasTurb 软件过渡态仿真模块对额定工况甩负荷情况进行了研究。设定当燃气轮机运行至第 5 s 时,在随后的 0.1 s 内突然发生甩负荷。为了比较有无低压压气机出口放气对甩负荷性能的影响,分别模拟了放气阀放气为 0 和 25% 两种情况。计算时设定有放气的放气阀打开时间为甩负荷后 0.1 s,计算结果如图 8 所示,图中 8(a) 和 8(b) 分别对应低压压气机出口无放气和放气 25%。当无放气时动力涡轮  $n$  超调量 11% 转速恢复时间为 23 s,低压压气机基本没有喘振裕度,而当甩负荷同时放气 25% 时,动力涡轮超调量减少 3% 转速恢复时间减少 10 s,另外低压压气机喘振裕度上升明显,满足压气机工作稳定性要求。压气机出口放气可在一定程度改善甩负荷时动态性能,但随着放气

量的增大,油气比也会随之增加,进而导致排气温度的上升。

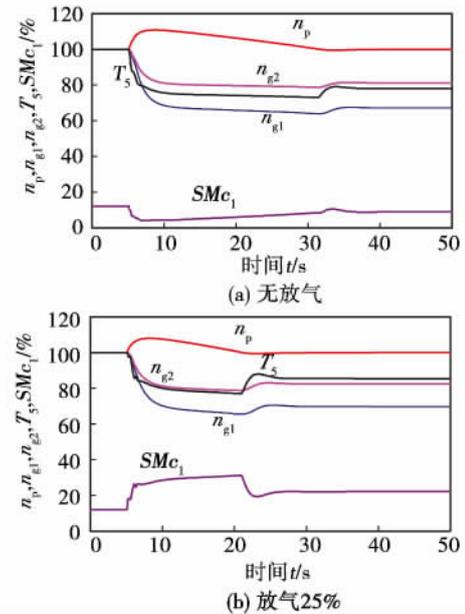


图 8 低压放气对甩负荷性能的影响

Fig. 8 Influence of the low pressure exhaust gas on the performance under the condition of load rejection

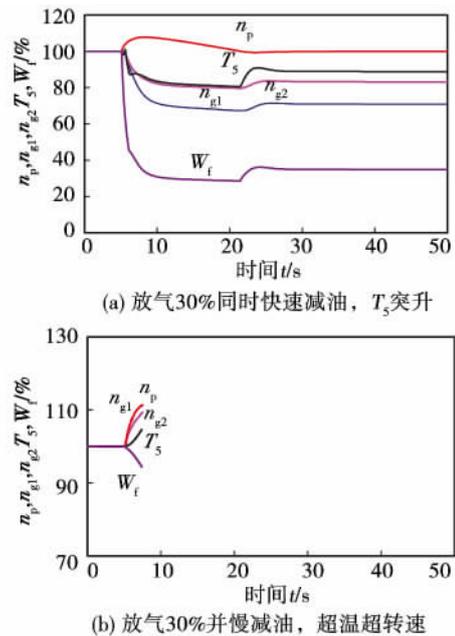


图 9 放气量及减油速率对燃气轮机性能参数的影响

Fig. 9 Effects of the amount of exhaust gas and fuel oil decreasing speed rate on the performance of the gas turbine

图 9(a) 为放气 30% 时主要性能参数变化结果,当放气阀刚打开时,  $T_5$  瞬间温升 20 °C,另外与放气 25% 相比,动力涡轮转速超调量及恢复时间改善量在减小。图 9(b) 为缓慢降低燃油流量的同时,低压压气机出口突然放气 30% 的计算结果,瞬间  $n_p$ 、 $n_{g1}$ 、 $n_{g2}$  和  $T_5$  将快速上升,随后发生超温和超转速现象。

通过上述计算表明,放气可在一定程度上改善甩负荷时转速动态性能,但应合理控制放气量,防止排气温度出现突升。另外甩负荷时若要提前打开低压压气机出口放气阀,则此时燃气发生器涡轮降转速度应足够快。

### 3 结 论

(1) 试验结果表明,与燃气发生器转速串级闭环控制和转速变化率加燃气发生器转速串级闭环控制规律相比,基于功率前馈加燃气发生器转速串级闭环控制在大负荷扰动时系统响应迅速,动静态品质良好,能够达到动力涡轮转速下垂量不大于 4%,恢复时间不超过 3 s 的瞬态发电要求。

(2) 高工况甩负荷时,提前打开低压压气机出口放气阀,不仅能够改善急剧减速时低压工作稳定性,还可及时抑制动力涡轮转速上冲惯性。仿真结果表明,甩负荷的同时放气 25% 可使动力涡轮转速超调量降低 3%,恢复时间减少 10 s。

(3) 提前打开低压压气机出口放气阀放气可在一定程度上改善甩负荷时动态响应性能,但应调节好油气比,防止出现排气温度突升或超温、超转速的问题。

#### 参考文献:

- [1] DAVID P, SIMON N. The development & application of the rolls-royce MT30 marine gas turbine//ASME. Proceedings of ASME Turbo Expo 2011 [C]. Vancouver: American Society of Mechanical Engineers, 2011: 1-7.
- [2] 李徐嘉, 刘云生. 船用燃气轮机发电机组发展概述[J]. 船电技术, 2014, 34(34): 49-52.  
LI Xu-jia, LIU Yun-sheng. A survey in the development of warship-purposed gas turbine generator units [J]. Marine Electrical and Electronic Technology, 2014, 34(34): 49-52.
- [3] 胥进, 张时飞, 施文龙. 燃气轮机在自备电站中应用的研究[J]. 动力工程, 2002, 22(1): 1646-1649.  
XU Jin, ZHANG Shi-fei, SHI Wen-long. Study of the applications

of gas turbines in self-supply power plants [J]. Power Engineering, 2002, 22(1): 1646-1649.

- [4] 沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司. 燃气轮机原理、结构与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.  
Shenyang Liming Aeroengine(Group) Co. Ltd. Principles, structure and applications of gas turbines [M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [5] 张磊. 间冷循环燃气轮机发电模块负荷突变半物理仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所, 2013.  
ZHANG Lei. Study of the semi-physical simulation of the power generation module of an intercooling cycle gas turbine during an abrupt change of load [D]. Harbin: Harbin Marine Boiler and Turbine Research Institute, 2013.
- [6] XIE Zhiwu, YU Jun, LIU Jinyang. Applying UML to gas turbine engines simulation//IEEE. Proceedings of the IEEE International Conference Technology of Object Oriented Languages and Systems 1999 [C]. Florence: Institute of Electrical and Electronics?, 1999: 200-205.
- [7] 卫琛喻, 臧述升. 船舶电力推进三轴燃气轮机动态性能仿真及控制策略研究[J]. 中国造船, 2012, 53(4): 184-191.  
WEI Chen-yu, ZANG Shu-sheng. Study of the dynamic simulation of and control strategies for three-shaft gas turbines in marine electric power propulsion [J]. China Shipbuilding, 2012, 53(4): 184-191.
- [8] 梁宁宁. 航空涡轴发动机建模与控制规律研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.  
LIANG Ning-ning. Modeling of a Turbo-shaft Aeroengine and study of the Control Strategies [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [9] 刘尚明, 寇可新, 倪维斗. 串级控制系统在燃机电站控制系统中的应用[J]. 清华大学学报, 1997, 37(S1): 15-17.  
LIU Shang-ming, KOU Ke-xin, NI Wei-dou. Applications of a single stage control system in the control systems of gas turbine-based power plants [J]. Journal of Tsinghua University, 1997, 37(S1): 15-17.
- [10] 朱行健, 王雪瑜. 燃气轮机工作原理及性能[M]. 北京: 科学出版社, 1992.  
ZHU Xing-jian, WANG Xue-yu. Working principles and performance of gas turbines [M]. Beijing: Science Press, 1992.
- [11] BRIAN P, LOUIS D, JEAN F L. Enhancements to the load acceptance and rejection capability of a high pressure aeroderivative engine//ASME Power for Turbo Expo - Land, Sea & Air 2007. Proceedings of ASME Turbo Expo 2007. [C]. Montreal: American Society of Mechanical Engineers, 2007: 1-10.
- [12] 黄开明, 尹泽勇, 黄金泉. 参数限制对涡轴发动机过渡态控制的影响[J]. 航空动力学报, 2006, 21(02): 432-436.  
HUANG Kai-ming, YIN Ze-yong, HUANG Jin-quan. Influence of the limitation in parameters on the transient state control of a turbo-shaft engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(2): 432-436.
- [13] 丁琳. 涡轴发动机数字控制与仿真技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.  
DING Lin. Study of the digital control and simulation technology for turbo-shaft engines [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.

(刘瑶 编辑)

A straight impeller equipped with the NACA65-810 airfoil and impellers installed with blades forward and backwards bent respectively along the circumferential direction were designed by using a three-dimensional aerodynamic design method and a CFD (computational fluid dynamics) software was adopted to simulate their aerodynamic performance and analyze the spacial development of their leakage flows and vortexes in the three blade tip clearances beyond the impeller as well as the distribution of the static pressure losses and entropy in the blade tip clearances. It has been found that after the straight impeller had been forward bent along the circumferential direction, the entrainment ability of the leakage flow in the blade tip clearance will become weak and the initial location of the leakage vortexes will shift to a location away from the leading edge of the blades with the height of the center of the leakage vortex along the radial direction being kept unchanged, thus weakening the interference of the blade tip leakage vortex to the main stream. After the straight impeller had been backwards bent along the circumferential direction, the entrainment ability of the leakage flow in the blade tip clearance will become strong and the initial location of the leakage vortexes will shift to a location close to the leading edge of the blades with the height of the center of the leakage vortex along the radial direction away from the leading edge of the blade being notably lowered, thus expanding the dispersion range of the vortex core at the downstream, strengthening the interference of the blade tip leakage vortex with the main stream and unfavorable to lowering the blade tip leakage losses. **Key words:** NACA65 airfoil, bending along the circumferential direction, blade tip clearance, leakage flow, numerical analysis

三轴燃气轮机发电机组突变负载控制策略研究 = **Study of the Strategies for Controlling the Abruptly Changed Load of a Three-shaft Gas Turbine Power Generator Unit** [刊, 汉] / ZHANG Ya-dong, JIANG Li-yun, SONG Shao-hua, OU Yong-gang (Shenyang Engine Design Research Institute, China Aviation Industry Group Corporation, Shenyang, China, Post Code: 110015) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016, 31(11). - 26 ~ 31

On the basis of the experiment and simulation of an integral machine, studied were the strategies for controlling the abruptly changed load of a three shaft gas turbine power generator unit. The test results show that the improved power forward feed + gas turbine rotating speed cascade PID closed cycle control version features a quick response, strong anti-interference ability and good self adaptability, thus capable of meeting the needs for transient power generation. In the case of an abrupt increase of a 40% load, the drop in the rotating speed of the power turbine will not be higher than 4% and the recovery time duration will not exceed 2 s. The simulation results show that in the case of load rejection, to open in advance the bleeding valve at the outlet of the low pressure air compressor to bleed air not only can improve the work allowance but also can contain the growth of the rotating speed of the power turbine. When the air quantity bled arrives at 25% of the rated air flow rate, the overshoot of the rotating speed of the power turbine will decline by 3% and the recovery time duration will shorten by 10 s compared with those when no air is bled. **Key words:** abruptly changed load, control strategy, cascade, forward feed, experiment and simulation