

蒸汽注入式燃气轮机部件的修改 设计及运行经验

骆凤标(中国船舶工业总公司)

〔摘要〕 本文对LM-5000STIG蒸汽注入式燃气轮机在美国运行了数千小时后的情况进行了整理分析,着重介绍原机组部件和系统的修改设计和运行时出现的问题及排除的措施。

关键词 蒸汽注入式燃气轮机 修改设计 运行经验 性能

1 前言

燃气轮机注入蒸汽是增加机组功率,改进循环效率、抑制 NO_x 排量的一项十分有效的措施。注入的蒸汽由燃气轮机排气余热锅炉产生。燃气轮机注入蒸汽后,其功率可增加约50%,如一台35 MW的燃气轮机注入蒸汽后,其功率可增加到50 MW。为适应功率的增加,燃气轮机的燃气发生器、动力透平和附件系统需作修改设计。本文简要阐述机组的修改设计和在运行时由于注入蒸汽遇到的一些问题和采取的措施。

2 部件和系统的修改设计

2.1 燃气发生器

蒸汽分高压、低压两路注入机组的三个部位:高压蒸汽的一路通过燃油喷嘴注入燃烧室,另一路通过支杆注入压气机排气口处;低压蒸汽通过空心静叶注入低压透平。压气机排气口处支杆和低压透平叶片需重新

设计,并要增加压气机排气口处的蒸汽通道、燃烧室和低压透平的蒸汽总管、公用的蒸汽/燃油喷嘴。LM5000燃气轮机注入蒸汽后,如为全蒸汽注入式,其功率从25 000—39 000 kW增加到50 000—61 000 kW,需注入的高压蒸汽量最大时为36 000 kg/h,低压蒸汽量为32 000 kg/h。因此,必然增加了进入高压透平的燃气流量,为使其与气动性能相匹配,第一级静叶和动叶需修改设计,静叶的喷嘴面积增加(6.5~7)%,动叶进口角需转动3度。

2.2 动力透平

动力透平的气动性能和机械耐久强度是按全蒸汽注入式的运行条件下进行全面复核的,燃气的进口压力和流量大约都增加了3%,叶片的气动载荷与原设计点相比,增加了约40%,由于动叶入口角的增加和角度的转动,叶片的总效率下降2.7%。但GE公司分析后认为,仍然是在实践上可以接受的范围内。对机械强度进行了核算,考虑到原设计留有一定余量,并由于注入蒸汽后,进口燃气温度相对较低,所以,只是将透平机

匣的连接螺钉材料由 CrMoV 改为 13CrMoWv。主要设计没做变动。

2.3 附件系统

图 1 为蒸汽注入系统原理线图，包括高压及低压蒸汽注入单元，增加了从余热锅炉出来的蒸汽流量的最终滤清、测量、控制和启动时水滴吹除等附件及仪表。高压蒸汽注

入单元分两路分别到燃烧室燃油喷嘴和压气机排气口处的蒸汽注入孔，每路装有切断阀、流量控制阀、流量传感器和预热阀。两路在流量控制阀下游处连接并配置截止阀，以防止在不注入蒸汽运行时的燃气回流。低压蒸汽注入单元与高压蒸汽注入单元的配置相同。

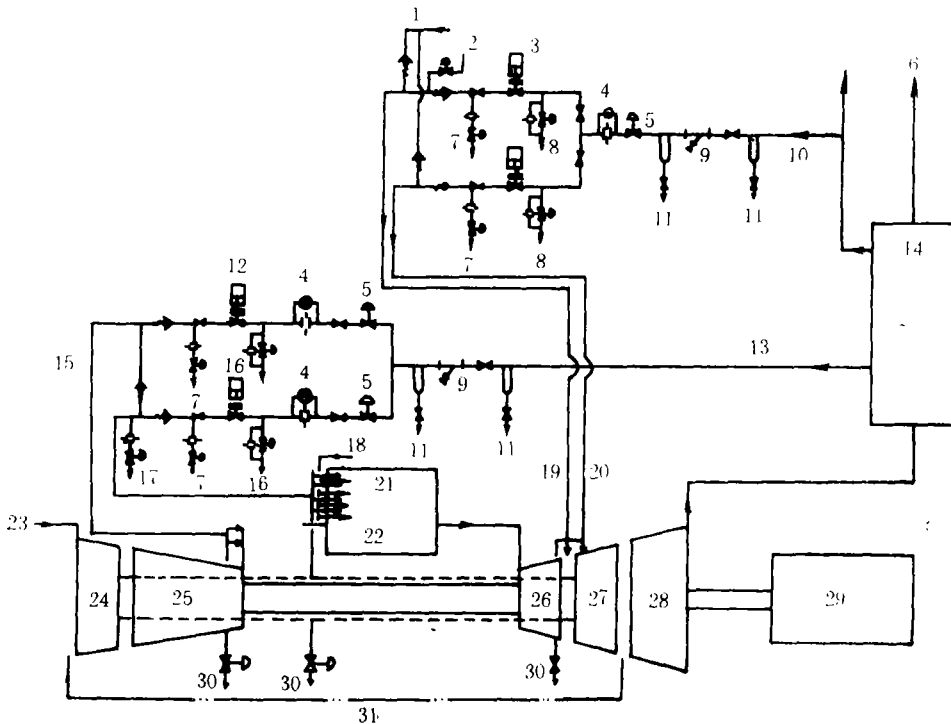


图 1 蒸汽喷射原理线路

- 1. 压气机抽气 2. 蒸汽排泄 3. 控制阀 4. 流量传感器 5. 切断阀 6. 排气 7. 空气泄孔 8. 蒸汽预热
- 9. 蒸汽过滤器 10. 低压蒸汽 11. 水吹除 12. 控制阀 13. 高压蒸汽 14. 排气余热锅炉 15. 压气机排气口处蒸汽
- 16. 预热蒸汽 17. 预热空气和疏水 18. 燃料 19. 总管 20. 低压蒸汽 21. 燃气/蒸汽喷嘴 22. 燃烧室
- 23. 空气 24. 低压压气机 25. 高压压气机 26. 高压透平 27. 低压透平 28. 动力透平 29. 发电机 30. 疏水
- 31. 燃气发生器

在设计蒸汽注入系统时，要注意预防水滴进入机内和快速控制蒸汽流量。系统的多处部位装有温度传感器，当流量控制阀进口处的蒸汽确认为过热蒸汽并发出温度信号时，才能启动蒸汽注入式运行。当电机负荷突然卸载，燃料在瞬间快速变化时，为避免燃烧室内的火焰向外串出，系统中装有快速反应控制阀，并使流量控制阀下游的管道体

积设计得最小。

蒸汽注入燃气轮机的控制系统为数示电子式，增加了以下功能：（1）按需要控制蒸汽；（2）用压气机出口压力限制蒸汽流量；（3）蒸汽注入的启动、水吹除、预热、开启流量控制阀的自动顺序；（4）出现事故时切断蒸汽程序。

3 性能和放射物

表1为LM5000燃气轮机在全蒸汽注入时的性能和放射物估算值。估算是基于余热锅炉不作补燃和蒸汽流量为最大时的基础上进行的。表中表明，功率增加了50%，排气中

NO_x 排量与不注入蒸汽的原机相比，仅为原机的1/7，但CO的含量随着燃烧室蒸汽流量的增加而略有增加。因此，燃烧室蒸汽量根据CO含量的极限值而加以限制。在现场运行时的测量结果如图2和3。这一效果表明蒸汽注入是增加燃气轮机功率、抑制NO_x排量的极为有效的途径。

表 1 LM5000STIG 蒸汽注入燃气轮机性能估算值

运行条件	不注入蒸汽	半注入蒸汽式 高压蒸汽注入	全蒸汽注入式 高压/低压蒸汽注入
功率 (kW)	32 200	45 900	50 100
热效率 (%)	36.10	41.20	43.30
压气机空气流量 (kg/s)	121.40	137.20	138.00
压比	24.80	30.80	31.60
燃油流量 (kg/h)	7 400	9 080	9 420
高压透平进口温度 (°C)	1 180	1 160	1 170
低压透平进口温度 (°C)	774	767	788
动力透平进口温度 (°C)	691	688	667
燃气排温 (°C)	456	422	402
动力透平转速 (r/min)	3 600	3 600	3 600
高压蒸汽流量 (kg/h)	0	33 800	34 500
低压蒸汽流量 (kg/h)	0	0	27 200
排气中NO _x 量 (ppm)	184	25	25
排气中CO量 (ppm)	3	25	24
热率 [kJ/ (kW·h)]	9 963	8 745	8 305

注：运行时条件为
 大气温度 15°C 大气压力 101.3kPa
 湿度 60% 燃料 天然气
 进气损失 0.98kPa 排气损失 2.45kPa
 注入蒸汽：高压300°C/5 276kPa， 低压250°C/2 030kPa

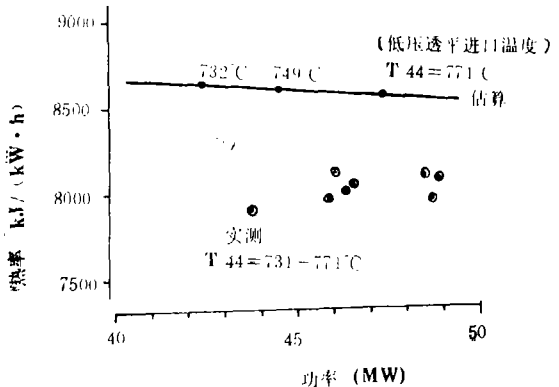


图 2 在全蒸汽注入时实测性能

修正条件：环境温度 17.2°C 环境压力 101.3 Pa
 湿度 95% 燃料 天然气
 高压蒸汽 34 240 kg/h 低压蒸汽 9 080 kg/h

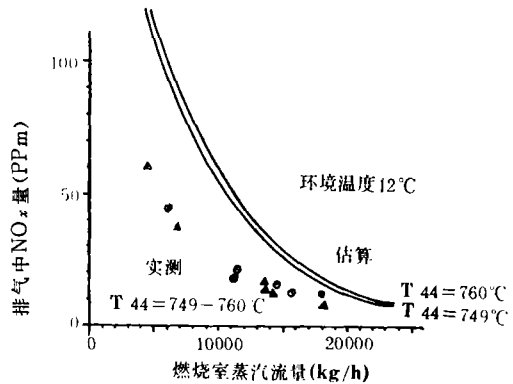


图 3 在全蒸汽注入时实测NO_x排量

4 运行时出现的问题和采取的措施

图4为LM5000蒸汽注入式燃气轮机的起动顺序，第一步按燃气轮机不注入蒸汽的控制程序自动程序进行，按下起动钮；起动器转动；发火、发电机同步；热机加速到最大功率并加热锅炉和蒸汽管道；开启水滴吹除阀，使从锅炉来的湿蒸汽通风于锅炉与蒸汽注入单元之间的管道；当蒸汽和切断阀前的蒸汽管道达到过热状态，开启切断阀和预热阀，同时使过热蒸汽通风于切断阀和流量控制阀之间的管道。流量控制阀下游的管道是由压气机出口的抽气或压气机第八级的抽气进行加热的。当燃烧室蒸汽线路段的蒸汽和管道的温度达到了完全的过热蒸汽状态，可首先启动燃烧室的蒸汽注入，并按预先设定时间开启燃烧室蒸汽控制阀，关闭预热阀直至燃烧室蒸汽流量达到6 800 kg/h，再起动低压压气机排气口处的蒸汽注入。由于蒸汽注入系统是新设计的，运行条件又有变更，开始阶段曾出现某些失误。如原设计的蒸汽注入系统在预热阀前有流量调整孔，造成预热时间过长。后来查明，这是由于通风的蒸汽量太小，管道损失大引起的。后来取消了调整孔，就缩短了预热时间。

运行实践表明，蒸汽控制阀开启和预热阀关闭的设定时间十分重要，因锅炉汽包的压力与蒸汽注入开始时的瞬变定时十分敏感，经过几次锅炉汽包故障的排除，才固定了最佳的开启和关闭程序。

经过几千小时运行后，发生了从透平机匣间、排气涡壳和机匣间的法兰面的冷却空气泄漏事故，使燃气轮机箱装体内通风空气的温度甚高，达到警戒水平，迫使机组停车。在估算时，认为原设计的机械耐久强度有一定余量，而在实际进行全蒸汽注入运行时，喷气推力增加了40%，通风空气和机匣

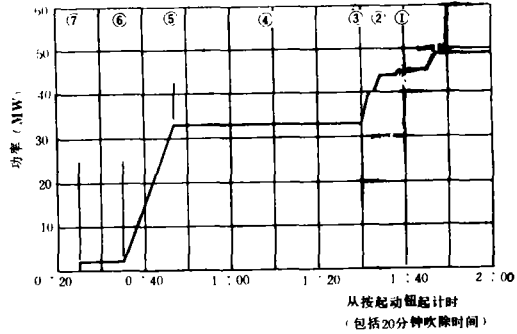


图 4 LM5000 (STIG) 全蒸汽注入时的起动特性

- ① 压气机排气口处蒸汽注入 (全蒸汽注入)
- ② 低压蒸汽注入13 600 kg/h
- ③ 燃烧室蒸汽注入 ④ 锅炉加热
- ⑤ 不注入蒸汽达到最大 (水吹除继续)
- ⑥ 燃气轮机加热完成
- ⑦ 断路器关闭

螺钉的温度分布也高于估算值。后来修改了机匣连接螺钉的材料，故障才得以排除。

5 结 论

对燃气轮机部件和系统进行某些修改设计，注入蒸汽，使燃气轮机的功率和NO_x排量得到显著改善。实际运行证明，机组安全可靠，对装燃气轮机的热电厂和热电复合循环装置的改装和新设计是完全可行的。

参 考 文 献

- 1 GE Marine & industrial engines. 1988.3(2)
GE Marine & industrial highlights. 1990.5(1)
- 2 Moeller D J, et al. Development, installation and operating results of a steam injection system(STIG) in a general electric LM 5000 gas generator. ASME paper 86-GT-231
- 3 Moeller D J, et al. World's first full STIG LM 5000 installed at Simpson paper company. ASME paper 88-GT-198
- 4 Robert L M, et al. The results of a steam injected gas turbine to increase power and

thermal efficiency, paper of 18th IECEC

P.615-625

5 Akio Suzuki, et al. Steam injection aero-

derivative gas turbine, its modification

design and operation experience, paper

of 19th CIMAC Conference

(李乡复 编辑)

Modification Design and Operating Experience of Steam Injected Gas Turbine Engine Components

Luo Fengbiao

(China State Shipbuilding Corporation)

Abstract

In this paper a comprehensive analysis is given of the operating experience of LM-5000 STIG steam injected gas turbine after it has accumulated several thousand operation hours in USA. The modification design of the original engine components and system as well as some measures for turbine engine troubleshooting are described in detail.

Key words: *steam injected gas turbine, modification design, operating experience, performance*

敬告作者

根据中国科学技术情报研究所的通知,为了能更好的反映出我国科技工作情况和水平,对科技期刊所发表的论文情况进行了统计分析。从3052种科技期刊中,选出1227种科技期刊作为统计源进行统计分析,中国科技情报所认为,这1227种科技期刊刊出的论文基本上反映了我国科技工作情况和水平。**热能动力工程**杂志也被选中,这是对**热能动力工程**杂志的鼓励。

通知还要求,凡今后所发表的论文必须将作者的详细地址、邮政编码、职务(职称)、年龄、性别及工作单位等标注清楚。所以,本刊在此敬告作者在向本刊投稿时,将上述几项标全,以便中国科学技术情报所对论文进行统计与分析。

感谢您对本刊工作的支持

—— 编辑部 ——