

M701F3 型燃气轮机转子精密点检策略研究及应用

王新年

(中海福建燃气发电有限公司, 福建 莆田 351100)

摘要: 介绍了 M701F3 型燃气轮机转子精密点检的内容及必要性,结合厂家建议与机组运行情况,优化了转子精密点检策略。在保证机组长期可靠运行的基础上,节省了燃气轮机转子精密点检租赁备用转子或购买新转子费用,为圆周拉杆形式燃气轮机转子检修工作提供参考。

关键词: M701F3 型燃气轮机;转子精密点检;实施策略

中图分类号: TK478

文献标志码: B

文章编号: 1009-2889(2024)01-0048-04

F 级燃气轮机转子结构复杂、形式多样,主要有圆周拉杆转子、中心拉杆转子、焊接转子等。在机组运行中燃气轮机转子出现异常,轻则造成机组非计划停运、跳机,重则造成重大设备事故。如某型燃气轮机压气机第三级轮盘盘面与拉杆螺栓接触面处出现了裂纹^[1],某型燃气轮机压气机与透平间连接拉杆螺栓断裂^[2]。

福建某燃气-蒸汽联合循环电厂一期建设 4 套 M701F3 型单轴联合循环机组,分别在 2008 年到 2010 年投产,已运行约 13 ~ 15 年。为保证机组长

周期安全运行,厂家根据该机型运行维护经验,建议开展燃气轮机转子精密点检。厂家建议在燃气轮机转子精密点检工作中,升级压气机转子拉杆螺栓,避免发生同型号机组燃气轮机压气机转子拉杆螺栓断裂事故。

1 M701F3 型燃气轮机转子简介

M701F3 型燃气轮机转子为圆周拉杆转子,包括装有叶片的压气机轴和装有叶片的透平轴(含中间轴),它们用拉杆螺栓连在一起,如图 1 所示。

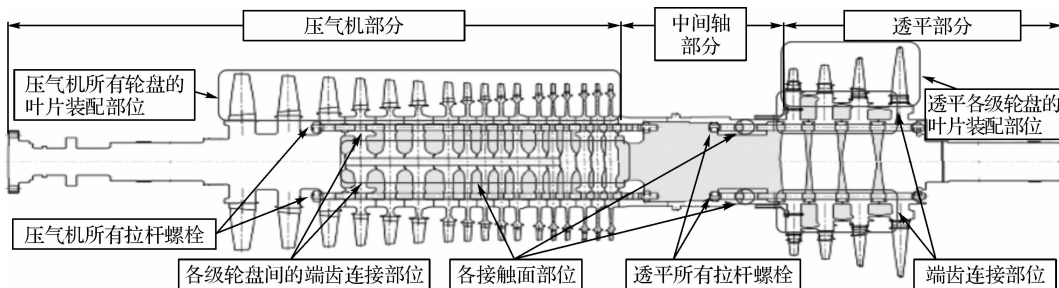


图 1 M701F3 燃气轮机转子简图

未装叶片的压气机转子组件包括压气机主轴和 14 个轮盘,用 12 根拉杆螺栓将轮盘与压气机轴固定在一起。压气机主轴前端的联轴器法兰与发电机上的联轴器法兰或汽轮机轴法兰相配。靠近主轴前端的推力盘两侧装配有推力轴承,以限制转子的轴向位移。

透平主轴包括 4 个轮盘和一个中间轴,它们用 12 根拉杆螺栓固定在一起,形成单一的运行组件。透平轮盘之间通过接合面周围的径向间端齿连接传递扭矩,轮盘的一侧为沙漏形齿,而与其对应轮盘结合面的齿为桶形。透平轮盘与轮盘间端齿的连接形式虽然简单,但精度高,且有足够的弹性以适应透平

收稿日期:2023-10-08

作者简介: 王新年(1978—),男,河南商丘人,硕士,高级工程师,主要从事燃气-蒸汽联合循环电厂运行维护管理工作,E-mail:80695796@qq.com。

各级间的温差。

2 燃气轮机转子精密点检必要性、内容及目的

M701F3 型燃气轮机需要通过定期检修来保证机组长周期安全稳定的运行。燃气轮机转子作为燃气轮机构成的重要部件,同样需要定期检修。

M701F3 型燃气轮机转子为圆周拉杆转子,需要特殊转子台位和设备才能拆解、组装,因此现场检修无法拆解转子,仅能对转子外露表面进行目视、渗透探伤、磁粉探伤等检查。燃气轮机转子有些部件需要拆解才能检查,如图 1 所示透平轮盘间端齿连接、压气机轮盘间的接触面、转子拉杆螺栓、径向销等。为了检查确认这些关键转子部件的状态并实施必要的维修,有必要完全分解转子,以检查其微动磨损情况和因腐蚀或裂纹引起的材质劣化情况,清理转子长期运行而积累的污垢和鳞片等,从而确保转子的健全性。

M701F3 型燃气轮机转子精密点检主要内容包括转子拆解、部件检查、必要的加工修复、更换劣化部件、再次组装等。结合同型号燃气轮机已发生压气机拉杆螺栓断裂事故案例分析及防范改进措施,在转子精密点检期间改进压气机拉杆螺栓,进一步提高可靠性。压气机拉杆螺栓改进有以下主要内容:拉杆螺栓及螺纹增大,以降低应力;螺母材质由镍铬钼合金更换为 12Cr,提升耐腐蚀性;对拉杆螺栓螺纹进行喷砂处理,以减少应力集中,防止出现应力疲劳裂纹。

M701F3 型燃气轮机转子精密点检的主要目的如下:拆解转子,清理并确认转子每一个零部件的健全性;使劣化的部件得到修理或更换,通过维修作业使转子恢复到完好状态;通过对冷却通道堵塞、轮盘接触面微动磨损等不良状态的修正,转子的劣化程度将得以减轻,转子也将恢复到适应长期运行要求的更可靠状态;通过实施精密点检,使转子保持完好状态、恢复其可靠性和降低非计划停机风险。

3 燃气轮机转子精密点检策略研究

M701F3 型燃气轮机转子长约 13 m,重约 90 t,精密点检需要将转子整体运回厂家。考虑到电厂转子现场拆出、大件运输返厂、厂家实施精密点检作业、大件运回电厂、电厂回装等,厂家预计整个机组检修作业总工期约 150 ~ 180 d。为了减少燃气轮机

转子精密点检期间整套机组停运的时间,把机组检修作业时间控制在常规大修 60 d 内,厂家给出了电厂独自购买新转子自行轮换和参与厂家组织的转子更换计划的两种方案。

3.1 方案一,电厂独自购买新转子自行轮换

电厂从厂家采购一根新的燃气轮机转子,在首台机组燃气轮机转子精密点检期间,将燃气轮机转子拆出后装入新转子,检修作业完成后机组调试投运。拆出的燃气轮机转子运回厂家实施转子精密点检作业,待首台机组燃气轮机转子精密点检作业完成运回电厂后,采用同样方式依次开展第 2、第 3、第 4 台机组燃气轮机转子精密点检作业,第 4 台机组燃气轮机转子精密点检作业完成后留作备用转子。

方案优点:检修工期可控,4 台机组燃气轮机转子精密点检作业总周期短,较少受厂家转子台位及其他电厂机组检修影响,不涉及不同电厂间转子产权及保险转移问题;机组发生燃气轮机转子异常事故时可使用备用转子紧急处理。

方案缺点:投资费用昂贵,采购一根新的燃气轮机转子约 7 000 万元;备用转子增加大量库存费用,资产闲置。

3.2 方案二,参与厂家组织的转子更换计划

厂家提供一根燃气轮机新转子和广东某 C 电厂一根燃气轮机备用转子,共两根燃气轮机转子。在厂家协调下,供 14 台 M701F3 型燃气轮机分两组轮换,开展燃气轮机转子精密点检作业。

以 A、B、C 三个电厂组成的 7 台燃气轮机为例,典型燃气轮机转子精密点检运作方式如下。将 A 电厂燃气轮机转子拆出后装入备用转子,拆出的 A 电厂燃气轮机转子运回厂家开展精密点检作业,A 电厂燃气轮机转子精密点检作业完成后运至 B 电厂,B 电厂将首台机组转子拆出后装入 A 电厂转子,拆出的 B 电厂燃气轮机转子运回厂家开展精密点检作业。B 电厂燃气轮机转子精密点检作业完成后运至 C 电厂,C 电厂将首台机组转子拆出后装入 B 电厂转子,拆出的 C 电厂燃气轮机转子运回厂家开展转子精密点检作业。采用同样方式依次完成 7 台燃气轮机转子精密点检。其中一组最后一根燃气轮机转子精密点检作业完成后厂家留作备用转子,另一组最后一根燃气轮机转子精密点检作业完成后返回广东某 C 电厂作备用转子。

方案优点:检修工期可控;相对于方案一费用较低,每台机组租赁转子费用约 700 ~ 800 万元,共约

3 000 万元,不会产生备用转子。

方案缺点:协调和商务工作复杂,需要与其他电厂协调检修工期;不同电厂燃气轮机转子使用寿命不同,涉及不同电厂转子产权及保险转移问题或者使用的其他电厂转子需要再次拆出返还问题。

3.3 结合电厂实际运行,研究不使用备用转子的方案

福建电网特点:总装机容量持续快速增长,核电、风电等清洁能源装机占比高,天气温度高时降温类负荷如空调负荷占比大^[3]。迎峰度夏负荷高,冬春季负荷低,夏季电网对燃气-蒸汽联合循环机组调峰需求高,冬春季电网对燃气-蒸汽联合循环机组调峰需求低。

福建某燃气-蒸汽联合循环电厂实际运行:电厂机组设计年运行时间为 3 500 h,因为天然气价格大幅上涨和福建省城市天然气用量上升的双重因素,自 2014 年后机组年运行时间逐年下降。2020 年机组平均年运行时间仅 1 800 h,约为设计运行时间的一半^[4]。冬春季电厂备用时间长,4 台机组极少同时运行,经过协调报备,2~3 台机组备用可满足电网调峰运行需要。

福建某燃气-蒸汽联合循环电厂在研究了厂家提供的两种方案后,结合福建电网和电厂机组实际运行情况,提出了不使用备用转子的燃气轮机转子精密点检方案三,进一步降低燃气轮机转子精密点检费用。方案三运作方式具体如下:福建某燃气-蒸汽联合循环电厂提前与福建电网、厂家做好报备、协商,在冬春季电网负荷较低、电量余量较大的时间段,如 11 月至来年 4 月,结合机组检修实施燃气轮机转子精密点检,检修作业中先尽快将燃气轮机转子拆出,提前协调大件运输将转子返厂,然后开展并完成不受燃气轮机转子影响的其他检修作业,完成后封存检修现场。电厂派人驻厂督促厂家协调按照最优工期完成转子精密点检作业,待燃气轮机转子精密点检作业完成运回电厂后,完成燃气轮机转子回装及相关检修作业,机组调试投运。采用同样方式依次开展第 2、第 3、第 4 台机组燃气轮机转子精密点检作业。

方案优点:节省大量购买或租赁燃气轮机转子费用,总体费用最低。

方案缺点:机组检修工期较常规大修长 3~4 个月,机组可利用率下降;完成 4 台机组燃气轮机转子精密点检总周期约需要 4~5 年;协调工作量大,需得到福建电网许可,需协调厂家转子台位排产,以安

排电厂燃气轮机转子精密点检作业。

在天然气持续高价位下福建某燃气-蒸汽联合循环电厂经营压力大,燃气轮机转子精密点检价格非常昂贵,约 2 000 万元/台次,4 台机组总费用约 8 000 万元,给电厂带来较大经济负担。考虑电厂发电量少和生产经营的实际困难,经过专题汇报福建电网,得到福建电网许可。电厂按照方案三,就实际运行情况与厂家多次沟通、协调,争取到厂家的支持,签署了燃气轮机转子精密点检合同。电厂采用方案三开展燃气轮机转子精密点检,即按照厂家建议有计划地实施燃气轮机转子精密点检,保证机组长期可靠运行,又避免采购或租用燃气轮机转子,降低了燃气轮机转子精密点检总体费用。

4 燃气轮机转子精密点检的实施

福建某燃气-蒸汽联合循环电厂经过与厂家协商,并报请福建电网批准,2022 年 11 月 12 日至 2023 年 4 月 10 日,结合 3 号燃气轮机机组大修开展了转子精密点检作业,计划工期 150 d。

作业关键节点如下:2022 年 11 月 12 日 3 号机组检修开工,12 月 17 日 3 号机组燃气轮机转子运达厂家,运达厂家后按照图 2 流程开展转子精密点检,并实施压机拉杆螺栓改进措施。

按流程开展前三步作业后,3 号机组燃气轮机转子上厂家专用转子台位开始解体作业,然后开展部件检查、维修、再组装等,再组装后实施圆跳动测量、低速动平衡。2023 年 3 月 4 日 3 号机组燃气轮机转子从厂家发运,3 月 9 日运达电厂,开展复装作业,4 月 5 日完成复装作业。

福建某燃气-蒸汽联合循环电厂在 3 号机组燃气轮机转子精密点检实施完成后,从拆装、运输、厂家作业反馈信息等作业进行全流程分析,合理优化大件运输、厂家转子专用台位使用等待时间,并对转子解体、检查、再组装等作业流程优化等,整体检修工期可缩短至 120~130 d。

3 号机组燃气轮机转子精密点检作业主要完成以下内容:更换压机和透平拉杆螺栓和螺母、压机机径向销、透平挡气板等;压机 3 级轮盘孔由 $\phi 84.5$ mm 扩大至 $\phi 90.5$ mm,压机拉杆螺栓由 $\phi 84$ mm 增大至 $\phi 90$ mm,螺纹尺寸由 $\phi 82.55$ mm 增大至 $\phi 88.9$ mm,螺母材质由镍铬钼合金更换为 12Cr;发现和解决转子运行积累问题,加工修正压机机轮盘及中间轴部分偏差大的止口,清理压机和

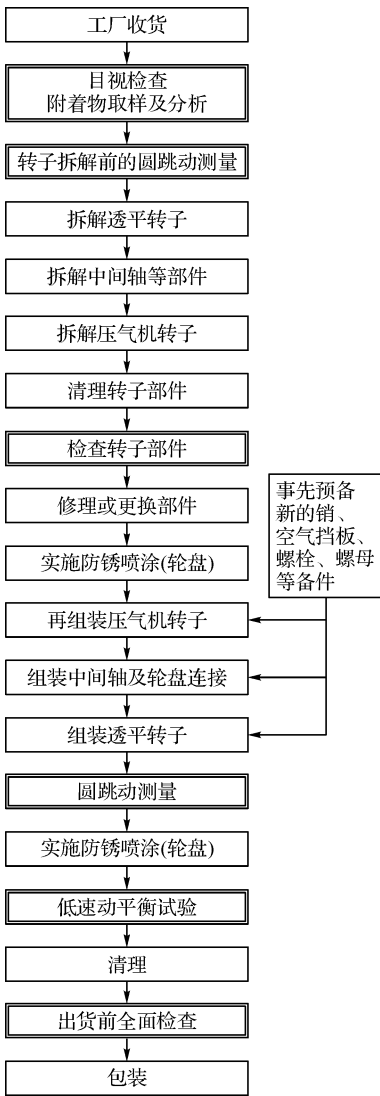


图 2 M701F3 燃气轮机转子精密点检流程简图
透平轮盘锈垢,清理压气机和透平叶根槽沉积物,修整部分变形,清理透平轮盘冷却孔等。

5 燃气轮机转子精密点检后机组试运行及总结

2023 年 4 月 7 日 3 号机组启动升速摩擦检查,满速时 2 号轴振最大值升至 122 μm 后趋于稳定,测取数据计算不平衡量和制定动平衡方案。4 月 8 日开展动平衡作业,透平侧加 5 只 142 g 平衡块,压气机侧加 4 只 115 g 平衡块。4 月 10 日机组启动调试

运行,最大轴振小于 70 μm ,燃烧调整及负荷摆动正常,机组投入运行。

使用 M701F3 型燃气轮机的燃气-蒸汽联合循环电厂燃气轮机转子精密点检实施情况:广东某 A 电厂采用厂家推荐方案一,已完成全部机组燃气轮机转子精密点检,增加了一根备用燃气轮机转子;广东某 B 电厂采用类似厂家推荐的方案二,从广东某 A 电厂租赁三次备用转子,已完成全部机组燃气轮机转子精密点检;广东某 C 电厂采用自有备用转子,采用类似厂家推荐方案一,已完成全部机组燃气轮机转子精密点检;北京某电厂计划采用类似厂家推荐的方案二,从广东某 A 或某 B 电厂租赁备用转子,开展燃气轮机转子精密点检,并计划在自有燃气轮机转子精密点检作业完成后拆出归还租赁转子。

与以上使用同型号燃气轮机电厂相比,福建某燃气-蒸汽联合循环电厂通过研究厂家推荐燃气轮机转子精密点检的两种方案,结合福建电网和电厂实际运行情况,提出了不使用备用燃气轮机转子的方案三,并顺利实施了 3 号机组燃气轮机转子精密点检,后续将陆续开展电厂余下 3 台机组燃气轮机转子精密点检,在保证机组长周期安全运行的前提下,节省了大量费用,减轻了经营压力。

国内已投运燃气-蒸汽联合循环电厂圆周拉杆燃气轮机转子占比较高,其中运行超过 12 年的燃气-蒸汽联合循环电厂将陆续面临燃气轮机转子返厂检查和维修的作业。本文提供的转子精密点检方案可供燃气轮机转子为圆周拉杆的燃气-蒸汽联合循环电厂参考。

参考文献:

[1] 姜建,蔡青春,陈愈. M701F 型燃机压气机转子裂纹原因探讨、处理对策及对运行方式的讨论[J]. 科技创新导报, 2010 (20):109.
[2] 钱程. 燃气轮机和压气机联轴器螺栓断裂原因分析[J]. 华电技术, 2012, 34(S1):47-49.
[3] 谭永香. 凝聚发展磅礴力量 全力谱写福建电网新篇章[J]. 政协天地, 2021(10):12-13.
[4] 黎晖,江昌标,王新年,等. M701F 机组交流润滑油泵变频改造分析与应用[J]. 燃气轮机技术, 2023, 36(01):64-68.

(下转第 72 页)