

状态监测与诊断用燃气轮机热力模型的构造方法

(海军工程大学, 湖北 武汉 430033) 谢志武 张仁兴
(上海交通大学, 上海 200030) 王永泓

摘要: 提出了以机组实测验收数据为估算依据, 在没有详细设计参数的情况下进行机组变工况计算的建模方法, 较好地解决了型号平均特性与特定机组特性之间的差异问题。采用本方法对某电站单轴燃气轮机变工况性能进行了估算, 计算结果与发表数据有较好的吻合, 证明了该方法的有效性, 可以用于燃气轮机状态监测与诊断。

关键词: 燃气轮机; 计算机仿真; 热力模型;
状态监测与诊断

中图分类号: TK47 文献标识码: A

1 引言

近年来, 我国国防、航空、电力等部门从国外引进了多种型号的燃气轮机。由于引进时间短, 使用经验有限, 在短时间内尚难总结出完整可靠的运行规律。而制造商一般仅提供平均的、最低限度的安全与效率信息, 他们给出的少量变工况指标和运行规范对于特定机组而言未免笼统与武断, 因此难以作为依据用于状态监测与诊断。

国外的大量研究和实践表明: 基于燃气轮机部件特性的机组热力模型可以在相当程度上反映机组的实际运行状况, 可以以上述模型为基准对实测数据进行监测和分析, 通过对热力模型的适当调整, 还能模拟机组的衰减工况, 并分析可能的故障。而且可以方便地与机组的日常生产与维护相结合, 对保障机组的安全高效运行具有重要意义。

在实际构造状态监测与诊断用燃气轮机热力模型时存在一个明显的困难: 凡是与机组设计、运行有关的数据均极为匮乏。不仅难以获得可靠的机组结构尺寸和热力设计参数, 在许多情况下, 连厂商提供的机组变工况规律也是残缺不全的。此时的任务已经从常规的根据参数完成模型设计转化为从有限的表象推测机组全范围工况这样一个逆向工程课题。

Saravanamuttoo^[1]于1974年提出了基于热力参

数的燃气轮机状态监测与诊断概念或称为流路分析(Gas Path Analysis), 此后他和Agrawal, Maclsaac等人^[2~4]共同提出了一些基于额定工况的部件变工况估算方法, 从而建立了实用的状态监测与诊断用燃气轮机热力模型; 1992年Zhu和Saravanamuttoo^[5]对前述方法进行了改进, 主要是在透平特性计算中采用了所谓“热端法”(Hot End Method)。Stamatis^[6]等分析了包括流路分析在内的各种热力模型的构造方法, 认为现有的各种方法建立的仅仅是同型号机组的平均特性, 故而不能反映每台特定机组在制造、安装、调试和维护中所产生的差异, 而这类差异对总体性能的影响是不可忽略的。针对这一问题, 他们提出了对平均化的热力模型进行调整和改进的自适应算法。

本文提出一条新的建模路线。我们力图在建模阶段就避免常规热力建模方法的弱点, 摒弃了从已发表设计参数出发的思路, 转而以实际机组验收实测数据作为建模依据, 避免了先建模再调整的复杂过程。

2 从验收数据出发的建模思路

着眼于部件特性的燃气轮机变工况理论一般都基于机组的设计工况, 然而制造商一般不提供详细的部件结构和热力设计资料, 这使得常规的设计点估算产生了很大的不确定性。我们认为, 仅仅根据有限的发表数据估算设计工况是不够的, 这不仅是由于型号较新或较冷僻的机组没有合用的数据, 即便对于数据已经较为充分的机组而言, 也经常会遇到数据不一致, 甚至相互矛盾的情况。从不可靠的数据出发构造模型是不明智的, 即便数据来源相当可靠, 仍存在具体机组因制造、装配和维护引起的对额定工况的偏离, 因而平均的设计工况数据对某一特定机组的适用性仍值得怀疑。

为避免上述困难,我们提出将估算的出发点从设计工况转移到机组验收工况。这不仅是由于日常记录常常包含大量错误信息^[3]而验收测量一般较为准确,而且因为验收标志着对机组无故障运转的认证。由于测量困难,机组的验收数据一般不包括透平进口温度和一些工质流量信息,但透平效率和压气机抽气量仅有一个不大的变动范围,因此可以容易地根据油耗和功率加以确定,之后验收工况即可确定。

既然验收工况是设计工况的一个变工况,显然只要假定了正确的基准工况,就一定能通过变工况计算得到验收工况。也就是说,可以利用某一基准工况下的变工况计算方法,以验收工况为依据反推基准工况。注意到此时对上述基准工况并无特别限定。它可以是额定工况,因而可以使用 Saravanamuttoo 方法进行变工况计算。即便基准工况不是额定工况,如在 Robbins 和 Dugan 方法^[7]中的那样,上述方法仍可使用,而且不需要已知任何设计参数。在上述任一情况下,已知的设计性能或额定参数都可以作为附加的校核条件,用于提高估算的精度。上述方法不仅使变工况计算有了一个较为可靠的出发点,同时还带来了一个附加的好处,此时的变工况计算必然是针对当前机组,因而同一型号不同机组因制造、装配和运行维护所造成的各种偏差都被自然地包括在模型中了,此时已无需对模型另作调整。

3 部件特性的估算方法

压气机特性的估算方法很多,但适合在本文所述条件下使用的则以统计方法为主。我们采用 Robbins 和 Dugan 方法进行压气机特性估算,取得了较好的效果。具体地说,首先估计一个压气机基准点,该点定义为压气机全工作范围内的最高效率点。以基准点为准,根据多台压气机的统计特性获得本台压气机的变工况特性曲线。需要说明的是,统计特性的使用是有一定误差的,一般说来,统计源压气机与估算压气机的种类、型号越接近,估算效果就越好。

基于级特性叠加的透平级组特性估算方法具有较高精度,然而由国外引进的机组一般不提供透平叶型和尺寸,因而无法获得透平级特性。柯特略尔方法对透平级特性作了一些简化假定,在此基础上进行的级特性叠加虽有一定误差,却比 Fluegel 公式精确,适用于透平级数界于 2~4 级的燃气轮机。本

文采用改进的柯特略尔方法^[8],通过逆算法^[9]的引入,弱化了原来的简化假定,避免了临界级引起的计算不稳定。

部件特性估算完毕后即可进行稳态工况的匹配计算了。匹配的主要依据是质量、能量和功的守恒关系,见参考文献[10],这里不再赘述。具体建模步骤见图 1。

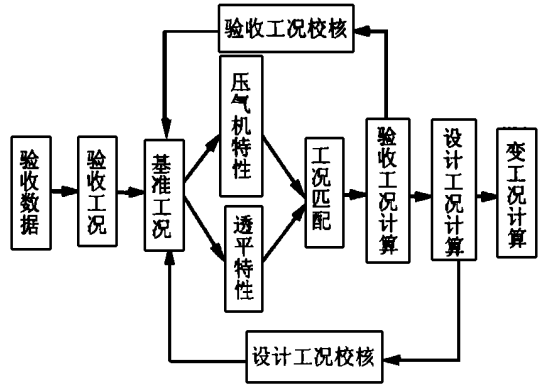


图 1 建模流程示意图

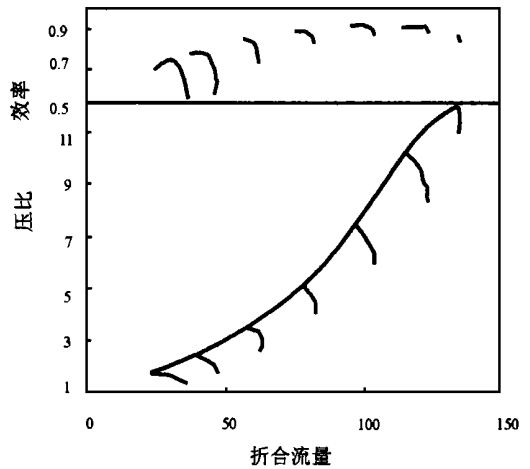


图 2 压气机特性估算结果

4 算例及分析

采用前述方法建立了某电站用单轴燃气轮机状态监测模型。表 1 为机组验收工况的匹配结果,计算与实测数据的最大误差小于 0.5%。图 2 及图 3 为压气机和透平的特性估算结果。根据上述结果进行了机组变工况计算,所得到的电端功率、电端热耗和透平燃气流量的计算结果与厂商给定数据的比较见图 4,其中的误差既包括模型本身的误差,也计入了机组平均性能与特定机组间的偏差,总的说两者符合得比较好,从而验证了本方法的有效性。本算

例虽然针对单轴机组,但全部模型稍加改动即可用于更复杂的机组结构形式。

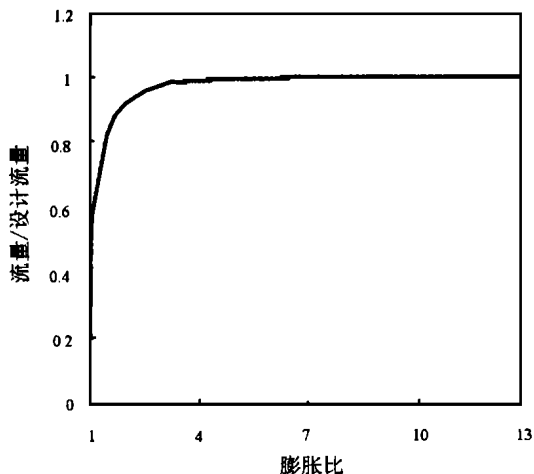


图3 涡轮特性估算结果

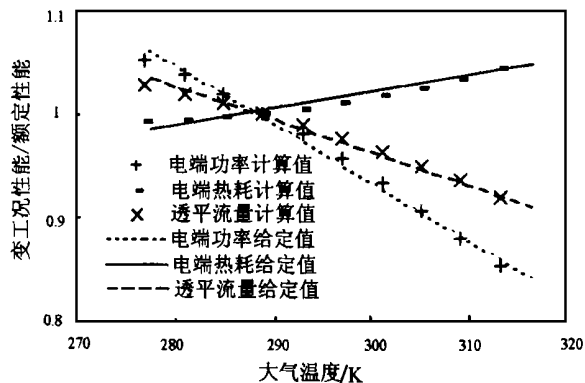


图4 某发电机组变工况性能计算值与给定值的比较

表1 某机组验收工况估算结果

	温度/K	压力/Pa	流量/kg·s ⁻¹
压气机进口	292.82	99 775	126.30
压气机出口	613.66	1 137 436	116.20
透平进口	1 364.00	1 103 313	128.97
透平出口	821.76	104 298	128.97
功率 34 858 kW 效率 32.0% 压气机效率 89.83% 透平效率 90.89%			

5 结论

提出了以机组实测试验数据为估算依据,在没有详细设计参数的情况下进行机组变工况计算的建模方法,较好地解决了型号平均特性与特定机组特性之间的差异问题,计算结果与实测数据有较好的吻合,可以用于燃气轮机性能的状态监测与诊断。

参考文献:

- [1] Saravanamuttoo H I H. Gas path analysis for pipeline gas turbines [R]. *Gas Turbine Operation and Maintenance Symposium*. National Research Council of Canada, 1974.
- [2] Agrawal RK, MacIsaac BD, Saravanamuttoo H I H. An analysis procedure for the validation of on-site performance measurements of gas turbines[J]. *Journal of Engineering for Power*, 1979, 101: 405-414.
- [3] Saravanamuttoo H I H. A low cost, on-site performance monitoring system[R]. ASME Paper No. 79-GT-24, 1979.
- [4] Saravanamuttoo H I H, MacIsaac B D. Thermodynamic model for pipeline gas turbine diagnostics[J]. *Journal of Engineering for Power*, 1983, 105: 875-884.
- [5] Zhu P, Saravanamuttoo H I H. Simulation of an advanced twin-spool industrial gas turbine[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1992, 114: 180-186.
- [6] Stamatis A, Mathioudakis K, Papailou K D. Adaptive simulation of gas turbine performance[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1990, 112: 168-175.
- [7] Robbins W H, Dugan J F Jr. Prediction of off-design performance of multistage compressor[R]. N65-23355, 1965.
- [8] 谢志武,王永泓,洪波,等.逆算法对涡轮特性柯特略尔估算的改进[J].*热能动力工程*, 1998, 13(3): 185-188.
- [9] Wang Yonghong. A new method of predicting the performance of gas turbine engines[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1991, 113: 106-111.
- [10] 翁史烈.燃气轮机性能分析[M].上海:上海交通大学出版社, 1987.

(何静芳 编辑)

sion-based speed regulation devices. In connection with practical uses the performance of these devices are also compared with that of other types of speed-regulation ones. **Key words:** frequency conversion-based speed regulation, rectification, inversion, constant torque

状态监测与诊断用燃气轮机热力模型的构造方法 = A Method for the Construction of a Thermodynamic Model for Gas Turbine Engine Condition Monitoring and Diagnosis [刊, 汉] / XIE Zhi-wu, ZHANG Ren-xing (Naval Engineering University, Wuhan, Hubei, China, Post Code: 430033), WANG Yong-hong (Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(4). — 410 ~ 412

The authors have proposed a new method of model construction for the prediction of gas turbine off-design performance. Instead of relying on an engine's published design point data the proposed method uses calibrated acceptance test data to serve as the basis for engine performance evaluation and prediction. The deviation in performance of a specific engine from the model's average performance has been taken into account in the model with no need for further rectification. The off-design performance of the single-shaft gas turbine of a power station has been evaluated by using the present method. The calculated results are in fairly good agreement with the published data, thus testifying to the validity of the method. The latter is particularly suited for use in gas turbine condition monitoring and diagnosis. **Key words:** gas turbine, computer-based simulation, thermodynamic model, condition monitoring and diagnosis

舰船用热工参数智能数字检测仪的设计和应用 = Design and Application of Intelligent and Digital Devices for the Measurement and Detection of Thermodynamic Parameters of Naval Propulsion Plants [刊, 汉] / LUO Kang-ming (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(4). — 413 ~ 416

With the successful development of Model SZW-01 intelligent and digital display devices it is now possible to realize the automatic measurement and detection on-site of the thermodynamic parameters of a naval main propulsion plant. Moreover, the display of all these parameters can be concentrated on a few command posts with alarm functions also provided. Described in this paper are the design of the computer system hardware and software of the above-cited intelligent and digital display device, its tests as well as its installation on board a naval vessel for routine operation. **Key words:** scale transformation, digital zero-setting, full automatic calibration, failure diagnosis

一种基于 PLC 的火电厂微机监控系统及其数据通信的实现 = Programmable Logic Controller-based Microcomputer Monitoring System for a Thermal Power Plant and Realization of Its Data Communication [刊, 汉] / XIAO Da-chu, GE Peng, LIAO Qun (Thermal Power Engineering Department, Wuhan University of Water Resources and Electrical Power, Wuhan, Hubei, China, Post Code: 430072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(4). — 417 ~ 419

With the data acquisition system (DAS) modification project of Hebi Thermal Power Plant being taken as an example and based on DDE and Net DDE mechanism under Windows environment the authors expound a monitoring system structure, hardware and software configuration, its performance and a realization of network data communication. All the above has provided a well thought-out approach for the development of a microcomputer-based monitoring system for use in thermal power plants. **Key words:** thermal power plant, microcomputer-based monitoring system, dynamic data exchange, data communication

基于热参数的汽轮发电机组多故障诊断模型 = Multiple-failure Diagnosis Model of Turbogenerators Based on Thermodynamic Parameters [刊, 汉] / GE Zhi-hua, SONG Zhi-ping, LI Ru-xiang, TIAN Song-feng (North China Electrical Power University, Baoding, Hebei, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy