

废气复合透平系统的热技术经济学分析和设计优化

(华南理工大学工商管理学院) 唐丽春

(广州市能源规划设计所) 潘家琰

摘要: 用热技术经济学原理与 BOX 非线性约束(复合型)优化法相结合的方法, 对大型柴油机动力系统中废气复合透平系统(Turbo Compound System 或 TCS)进行了热技术经济分析研究和设计优化计算。探讨的方法也可用作动力厂(站)可行性研究阶段方案设计时的参考。

关键词: 废气复合透平; 热经济学; 优化设计

中图分类号: U664.12

文献标识码: A

符号说明

a —下限值	b —上限值
C —定压比热	En —能量, (kJ)
I —隐式约束方程总数	J —能量系统或单元的能流输出总数
P —输出功率, (kW)	R —设计变量总数
T —温度($^{\circ}\text{C}$)或增压器的废气透平	

下标

0—环境	1, 2—能量及技术经济区 1, 2
a —新鲜空气	bt —废气增压器前
c —废气增压器的压缩机	e —排气
elt —增压器前的废气	ep —由柴油发电机发电
exh —增压器后的废气	hf —重燃油
j, j' —第 j 或 j' 能量流	m —机械
ME —喷入柴油主机的燃油	pa —定压压缩空气
pe —定压废气	PT —动力透平
$shaft$ —柴油机的主轴	t —透平或温度
T —增压器的废气透平	

1 前言

从80年代初开始, 大型柴油机增压器制造商一直致力于不断提高其效率的研究开发, 结果是大大减少了产生柴油机压缩进气的增压器消耗的废气量; 在此基础上, 进一步配套设计了一种动力透平, 用以转换这种高效增压系统省下的废气能量, 产生有用的动力(如电力、机械功)。已有实例在大型柴油机船舶动力站(5 000 kW 以上)采用这套系统, 经济性十分明显, 投资回收期不到两年^[1]。

诚然, 任何动力系统设计, 如采用较高效率的设备, 虽其经济性会提高, 但也增加系统的初始投资, 以致同时增加产品的折旧成本。因此, 动力系统的经济设计和设备的经济选择常常是互相矛盾的, 要进行优化平衡, 才有可能达到最佳的参数组合。

对此, 提出利用热技术经济学与非线性数学规划法中的 Box's Complex 法^[2,3]相结合的方法, 通过建立废气复合透平系统的优化设计模型, 对该动力系统进行结合实例的优化设计计算和热技术经济研究分析, 以探讨较为合理的大型柴油机废气透平复合系统参数的优化选择方法和途径。本文探讨的方法也可作为动力厂(站)可行性研究方案设计研究之用。

2 废气复合透平系统的物理模型

图1是并联型废气复合透平系统的物理模型, 废气从大型柴油机内排出, 一部分推动与增压器的空压机同轴的废气涡轮, 生产压缩空气。如果采用高效增压器, 则此废气涡轮不必消耗所有的柴油机排出废气就能生产足够的柴油机进气。因此剩余的废气可以引给动力透平, 再由该透平产生额外的有用电力。而传统的增压系统则是将所有的废气用于增压器产生压缩空气, 如有过剩则采用旁通阀将之引弃以浪费这部分废气能量。

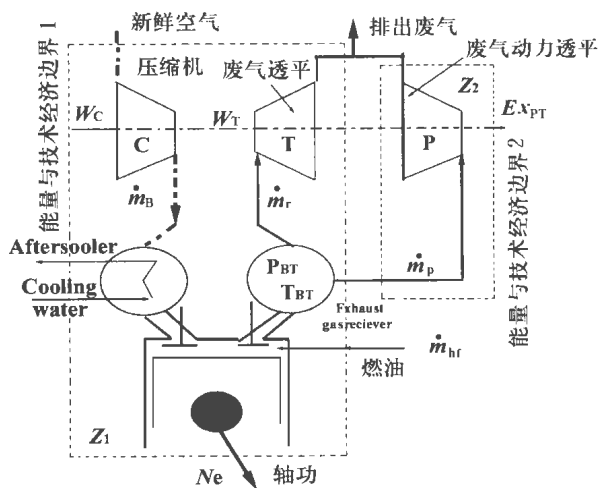


图1 带有平行动力透平的废气复合透平系统示意图

3 系统的热技术经济学模型

在建立废气复合透平系统热技术经济学现金流

量平衡方程前, 作如下假设:

- (a) 不计柴油机中冷却器及发动机本身的冷却液流的成本;
- (b) 增压器与动力透平的排出废气流成本近似相同。

图 1 中的虚线框是根据热技术经济学基本原理^[4, 5, 6]描述的能量及其成本区示意。按图所示的两个能量及技术经济学边界, 再根据“单位时间内流入成本区的可用能流成本与该区单位时间各单元的折旧成本之和应等于流出成本区的可用能流成本”, 建立如下两个成本流平衡方程:

$$C_{hf}Ex_{ME} + Z_1 = c_{shaft}Ne + (1 - \gamma)c_{ebt}Ex_{ebt} + \gamma c_{exh}Ex_{exh} \quad (1)$$

$$(1 - \gamma)(c_{ebt}Ex_{ebt} - c_{exh}Ex_{exh}) + Z_2 = c_{PT}Ex_{PT} \quad (2)$$

两方程中, Ex 为可用能(kW), c 指单位可用能成本(\$/(kW·h)), Ne 代表柴油机的功率(kW), Z 表示单位时间动力系统某单元或系统的初始投资回收期(\$/单位时间); 系数 γ 表示进入增压器的废气量占柴油机总排气量的比例, 为 0 ~ 1.0 之间, 其余符号及下标含义参见符号说明。

为确定动力透平产生的单位电力(可用能)成本 c_{PT} 函数(即为设计变量的函数), 首先要确定上述两方程中的其它可用能成本值。事实上, 方程(1)、(2)两式中除 c_{PT} 外, 尚有三个未知量, 即 c_{shaft} 和 c_{ebt} , c_{exh} 。两个方程四个变量, 必须另设两个辅助方程。文献[7] (注: 限于本文篇幅, 此处仅注出已发表的文章出处) 建议了“相对能质系数法”, 以近似补充超变量方程的辅助方程:

$$\varphi_{j,j'} = \xi_j / \xi_{j'} \quad (j \neq j'; j, j' = 1, 2, \dots, J; J \geq 2) \quad (3)$$

$$c_j = \varphi_{j,j'} \cdot c_{j'} \quad (j \neq j'; j, j' = 1, 2, \dots, J; J \geq 2) \quad (4)$$

式中能质系数 $\xi = Ex/En$, 指同一能流相对于同一环境下所携可用能与其能量值之比。 $\varphi_{j,j'}$ 指从同一个能量转换单元(或系统)输出的两个不同的能量流的能质系数比, 即相对能质系数。据此, 结合图 1, 分别取能量及技术经济学边界 1、2, 利用公式(4)可求出 c_{shaft} 、 c_{ebt} 和 c_{exh} 中的任意两个, 再代入方程(1)、(2), 即可求出 c_{PT} 函数, 即得到优化问题的目标函数。

4 优化问题的数学模型

根据上节讨论, 将方程(2)改写为 c_{PT} 的显式, 作为本优化问题的目标函数, 并结合 Box's Complex 方法的形式, 则本文讨论的优化问题可表述为:

$$\min_{c_{PT}} = \frac{(1 - \gamma)(c_{ebt}Ex_{ebt} - c_{exh}Ex_{exh}) + Z_{PT}}{Ex_{PT}}$$

$$= f(\vec{X}) \quad (5-1)$$

$$G_i(\vec{X}) \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, I) \quad (5-2)$$

$$\alpha_r \leq X_r \leq b_r \quad (r = 1, 2, \dots, R) \quad (5-3)$$

式(5-1)中, 设计矢量 $\vec{X} = (\eta_T, \eta_P, \eta_C, \rho_t, \rho_p)$, 符号 η_T, η_P 分别表示增压器的废气透平和动力透平的绝热效率, η_C 代表压缩机的绝热效率; ρ_t 和 ρ_p 分别为增压器后前废气温度、压力比值, 即 $\rho_t = T_{exh}/T_{bt}$ 和 $\rho_p = P_{exh}/P_{bt}$ 。上述五个量在本优化问题中定为设计变量。

式(5-2)代表隐式约束方程, 它们在本问题中具体可表达如下:

(a) 进入增压器的废气量占柴油机排出废气总量的比例 $\gamma \leq 1.0$,

$$\gamma = \left[\frac{Ex_c}{(\eta_c \eta_{TCm})} \right] / \left[C_{pe} m_{exh} T_{exh} (1/\rho_t - 1) \eta_T \right] \quad (6)$$

式中 η_{TCm} 为增压器总的机械效率, 可取值 0.98%。 Ex_c 为增压空气的可用能。

(b) 增压器的废气透平输出功与空气压缩机的需求功之差 $\Delta W \geq 0.0$,

$$\Delta W = \Delta W_T - \Delta W_C = m_{al} C_{pa} T_0 [(P/P_0)^{k_a - 1/k_a} - 1.0] / \eta_c - m_d C_{pe} T_{exh} (1/\rho_t - 1.0) \eta_T \eta_{TCm} \quad (7)$$

上两式中, m_a 和 m_e 分别为增压空气和废气的质量流率。

式(5-3)代表设计变量值的上下限。根据所采用的优化方法, 在优化迭代计算过程, 为使设计变量控制在逻辑值内, 有必要设置上下限值。为此, 设置:

- a. $0.75 \leq \eta_P \leq 0.93$;
- b. $0.75 \leq \eta_T \leq 0.93$;
- c. $0.75 \leq \eta_C \leq 0.88$ 。

而 ρ_t 与 ρ_p , 则根据计算方案不同, 分别规定其范围, 即

- d. $a_t \leq \rho_t \leq b_t$;
- e. $a_p \leq \rho_p \leq b_p$ 。 a_t, b_t, a_p 和 b_p 取决于柴油机的型式。
- f. $0.0 \leq \gamma \leq 1.0$;
- g. $0.0 \leq \Delta W \leq 3.0$ (kW)

寻优方法采用 Box's Complex 非线性约束优化法^[2, 3], 又称复合型法, 这种方法比较适用于目标函数不易直接表达成设计变量的函数的优化问题。

5 实例计算及结果分析

5.1 实例的输入数据

一艘外籍船舶的柴油主机型号为 6RND76M, 其增压器为旧型 VTR501 两台, 无动力透平装在增压系统内。该船主机全负荷时增压比为 $\pi_k = 2.48$ 。主机

系统的一些主要的技术数据列于表 1; 计算的环境状况为 20 °C、一个大气压; 设利率取为 15%, 动力系统年运行 280 天, 年维修费用设为年投资回收额的

6%, 重油价与柴油价为 95 \$/t 及 135 \$/t。为探讨原系统的技改潜力, 所有计算将基于 85%MCR 运行状态。

表 1 柴油机两种负荷状态的主要运行参数

主机负荷率	主机功率/kW	油耗/g · (kW · h) ⁻¹	TC 前废气温度/°C	TC 后废气温度/°C	增压空气温度/°C	主机扫气压/kPa	TC 后废气压力/kPa	中冷器空气压损/kPa
100% _{mcr}	10 584	194.5	448	318	167	296.5	102.10	0.755
85% _{mcr}	8 996.4	193.4	427	303	124	247 *	101.55	0.637

注: 表中所列数据为该船试航时的记录值; TC 代表废气涡轮增压器; mcr 指最大持续功率。

5.2 计算结果分析

5.2.1 计算的方案设置

方案一: 计算旧增压系统的技术经济指标, 并假设如进行技改, 采用高增压效率系统, 则改系统额外还可产生的经济效益(动力透平产生的电力);

方案二: 对原增压系统分别采用低、高两种效率的增压器时, 相应设置动力透平, 进行优化设计计算, 求出两种动力透平可产出的最低电力成本;

方案三: 对方案二进行技术经济敏感性分析。

5.2.2 计算结果及分析

为节省篇幅, 系统的设备估价及总投资计算参考文献[1, 4, 7, 8], 不再累述。计算通过自编的 FORTRAN 程序来实现。设计计算分“能量模型”、“技术经济模型”及“优化设计模型”三块进行。表 2 是上述三个方案计算结果的综合:

A. 由 1.4 计算编号的 η_{TC} 和 Ex_{PT} 两栏知, 当 η_{TC} (增压器的总绝热效率) 63.8% 上升到 72.6% 时, 在保持同样的增压比 $\pi_k = 2.48$ 条件下, 如设备动力透平则可发出的电功由 86 kW 上升到 455 kW, 即此时原系统有充足的技改潜力, 可设置动力透平以回收余能, 提高整个柴油机动力系统的经济效益。在此情况下, 应将增压器前的废气温度调高 7 °C (这是参数优化的结果建议)。表中的 γ 值说明: 增压器废气节省量逾多, 即增压器消耗的废气愈少, 则 γ 越小, 由此用于推动动力透平的废气量就越多, 其能产生的额外电功也就越大。

表 2 主要计算结果的汇总

参数项目	η_{TC}	T_{tk}	π_k	γ	Ex_{PT} /kW	c_{PT} \$ · kW ° h ⁻¹
系统采用低效增压器	1 63.8%	427 °C	2.48	0.95	86	0.044
系统采用高效增压器	2 72.6%	443 °C	3.14	0.97	65	0.058
系统采用低效增压器	3 63.8%	434 °C	2.48	0.89	240	0.037
系统采用高效增压器	4 72.6%	434 °C	2.48	0.79	455	0.027

B. 由编号 1、2 可知, 对于低效增压器系统, 通过对系统的优化设计, 可在一定的范围内提高设置动力透平的输出电力, 但是, 即使是以提高柴油机排温为代价(也是 7 °C), 其输出电力仍只有 240 kW, 实质上无多大的技改潜力。

C. 编号 3 是假设该柴油机的增压比 π_k 要求提

高, 这时为使增压器输出足够的空气压力, 即便采用高效增压器和提高 T_{tk} 至 443 °C, 也难以使动力透平产生可观的电力。

D. 由表中最后一列 c_{PT} 值可知: 单位动力透平输出的电力成本 c_{PT} 越小, 则装设废气复合透平系统就越经济。当然, 决策上是否设置动力透平, 应视其输出的功率大小和对柴油机原排气状态的影响大小而定。

6 小 结

(1) 采用热技术经济学原理和数学规划法相结合的方法, 对大型柴油机高效增压复合透平动力系统作了热技术经济分析和系统参数设置的优化选择研究, 方法是可行的。

(2) 所形成的探讨方法, 不仅适用于热动力厂(站)建设的可行性分析研究, 也可用于节能技术改造项目的可行性分析研究, 并为计算机应用于工程项目可行性分析研究作了一种有意义的尝试。

(3) 所引实例存在较大的节能技术改造的潜力。

参考文献

- [1] Streuli A. The promise of the power turbine. BBC Brovin Boveri & Company, Ltd., publication No. CH-Z 127020-E Switzerland 1985.
- [2] Box M J. New method of constrained optimization and a comparison with other methods. *The Computer Journal*, 1965, 8: 42~52.
- [3] Xiu L.Z. The optimization technology in engineering. Tain Jing University, 1989.
- [4] El-Sayed Y M, Gaggioli R A. Thermoconomics and the design of heat systems. *ASME, Journal of Engineering for Power*, 1970, 1: 27~38.
- [5] El-Sayed Y M, Gaggioli R A. Critical Review of second law costing methods- I, II; background and algebraic procedures. *ASME, J. of Energy Resources Technology*, 1989, 111: 1~15.
- [6] Tsatsaronis G. Thermo-economic analysis and optimization of energy system. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 1993, 19: 227~257.
- [7] 潘家琰. 船舶主机废气余热利用系统的佣经济分析及其优化设计. “中国工程热物理学会工程热力学与能源利用学术会议论文集”宜昌; 1995. 11: II-7, II-8.
- [8] Valero A, Tsatsaronis G, Frangopoulos C, Von Speckovsky M R, et al. CGAM problem: Definition and conventional solution. *Energy*, 1994, 19: 279~286.

(何静芳 编辑)

tion. This makes it possible to analyze the effect on gear mesh of such factors as gear box deformation, axial end loading and axial deflection, etc. A proper no-load gear mesh error may be generated to compensate gear mesh error under operating conditions. It is also feasible to verify gear strength on the basis of gear contact conditions. Under the precondition of an absence of increase in gear mesh error a rational support parallelism can be set. **Key words:** cylindrical gear, gear mesh error, strength

废气复合透平系统的热技术经济学分析和设计优化 = **Thermotechnical Economics Analysis and Design of a Waste Gas Turbo Compound System** [刊, 中]/Tang Lichun (Southern China University of Science & Technology), Pan Jiayan (Guangzhou Municipal Energy Source Planning Design Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2000, 15(1). - 28 ~ 30

By combining thermotechnical economics theory with BOX nonlinear constraint (compound type) optimization method a thermotechnico-economics analytical study and an optimized design calculation were conducted of a heavy-duty diesel waste gas turbo-compound system (TCS). The method discussed can provide some useful reference data during the scheme design of a power station at the feasibility study stage. **Key words:** waste gas turbo-compound system, thermotechnical economics, optimized design

某舰用冷凝器凝结水含氧量的测试 = **Test of Oxygen Content in the Condensate of a Naval Condenser** [刊, 中]/Xu Yan, Meng Fanzheng, Yin Yuxiang, (Harbin No. 703 Research Institute), et al // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2000, 15(1). - 31 ~ 32, 35

With the help of a novel device for measuring the oxygen content in water a dynamic detection was performed of the oxygen content of condensate at the outlet of a naval condenser working under various operating conditions. The resulting determination of the thermodynamic characteristics of the condenser can provide a requisite basis for its modification design later on. **Key words:** condensate, oxygen content, evaluation test

锅炉有缝电阻焊管制造工艺 = **Manufacturing Technology for Boiler Tube Seamed Resistance Welding** [刊, 中]/Liu Shuzhen, Zhu Hong, Cheng Wanbe (Harbin Boiler Co. Ltd.), et al // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2000, 15(1). - 33 ~ 35

LM5000STIG120 机组余热发电工程电气设计 = **Electrical Design of the Waste Heat Power Generation Project of a LM5000 STIG Unit** [刊, 中]/Sun Shifeng, Hu Guoju, Zhang Qingjiang (Harbin No. 703 Research Institute), et al // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2000, 15(1). - 36 ~ 38

A description is given of the main electrical connection design of a LM5000 STIG 120 unit for Shenzhen Yueliangwan Gas Turbine Power Plant. In addition, the plant auxiliary power supply of the Plant is also briefly discussed. **Key words:** short-circuit current, circuit breaker, reactor, dynamic stabilization, thermal stabilization

燃气脉冲在线吹灰装置及其控制系统的研制与应用 = **Development and Application of a Pulsed Gas-based On-line Soot-blowing Device and Its Control System** [刊, 中]/Li Zhonghua (Shanghai Jiaotong University), Han Tongtai, Liu Jianjun (China National Mine Engineering University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2000, 15(1). - 39 ~ 40

The use of rotary air heaters in thermal power plants generally gives rise to soot deposits-related serious corrosion, flue gas high flow-resistance and excessively high exhaust gas temperatures. To cope with the above-cited problems, the authors have developed a pulsed gas-based on-line soot-blower system, using explosive gas to serve as a soot-blowing gas source. In addition, a computer-based monitoring system has also been developed in connection with the soot-blowing unit. Practical use experience shows that the soot blower unit under discussion has the capability to conduct a safe, reliable and