

类热机结构优化特征及其论证

张晓晖

(苏州大学 热能系, 江苏 苏州 215006)

摘 要: 在已有热机构形优化特性以及类热机装置的构形优化特性分析基础上, 将类热机模型推广到一般的传输过程模型, 通过变分法导出了一般传输过程的构形优化准则, 证明了对于线性传输模型, 在有限尺寸约束条件下, 传输过程(或装置)熵产最小时, 传递系数在区域内等分是其基本特征。同时介绍了传输过程的构形优化在类热机装置分析和广义热力学优化理论研究中的应用, 初步验证了本文提出的构形优化特征, 并简要阐述其应用发展方向。

关键词: 热力学; 类热机; 传输过程; 优化

中图分类号: TK123 文献标识码: A

1 引言

在实际工程装置中, 经济性是主要目标之一, 即要考虑合理布置材料, 如体积小、重量轻是第二代能源系统(分布发电装置)新的设计概念, 航天、舰船及空间站的动力装置也要求质量轻、尺寸小, 以增加有效空间, 另外, 对于实际装置系统, 为使达到最大输出功率, 可以增加热机换热器尺寸面积, 但是实际材料总是有限的, 不可能无限制地增加尺寸面积, 而合理优化热机的结构尺寸可以达到目的。研究表明, 在有限尺寸约束下, 热机存在最佳结构布置特性。

动力系统中存在结构优化问题和相应优化特性, 在一些传输过程中也存在与热机结构优化类似情形。如流体流动做功装置、生命过程(含肌肉收缩、肺部呼吸和心脏血液循环过程)、电路系统等。

上述问题共同点是对于不同的工程装置或生物系统, 如何在一定的材料限定内进行材料合理布置, 确定结构的最优构形, 或在一定时

间约束下, 确定时间的最优分配, 以优化能量转换过程, 使过程具有最佳性能。

针对这些过程的共同点, 本文在对上述装置系统结构优化分析基础上, 依据“类热机”概念(详见下面解释), 将此类现象推广到一般的传输过程, 使分析对象广义化, 从基本理论出发, 通过变分法论证了对线性传输过程这一类广义热力过程都适用的构形优化特征。

2 传统热机构形优化特性

很多因素影响热机中传热结构的分析和计算, 以下对于热机结构的优化结果是在基于一定条件基础上分析得到。

对于如图 1(a)所示装置^[1], 当总的传热系数限定条件下 $U_H A_H + U_L A_L = UA$ (常数), 热机最大输出功率时, 最佳的高温和低温侧传热系数分别是总的传热系数的一半:

$$(U_H A_H)_{opt} = (U_L A_L)_{opt} = \frac{1}{2} UA$$

理想的 Brayton 循环在最大输出功率时, 最佳的高温和低温侧传热系数分配也是总的约束传热系数

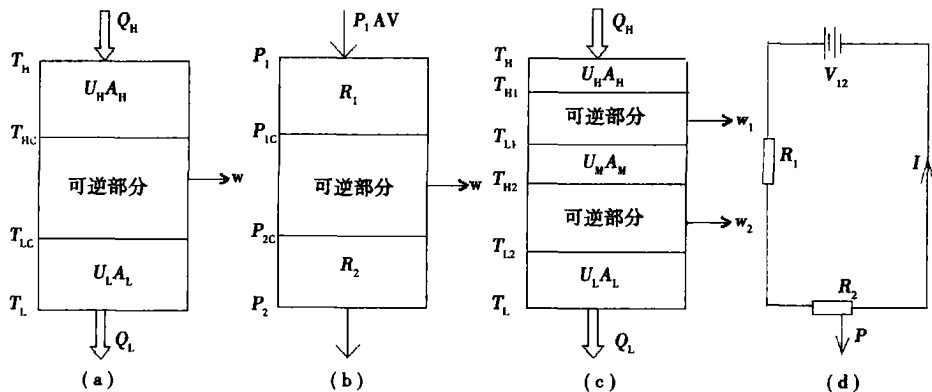


图 1 类热机装置

的一半^[1]。

联合循环热机(combined-cycle power plant)可看成具有3个换热器的热机^[2],如图1(c)在总传热系数一定条件下, $U_H A_H + U_M A_M + U_L A_L = UA$ (常数),在最大输出功率时,3个换热器的传热系数分配关系为: $(U_H A_H)_{opt} = (U_M A_M)_{opt} = (U_L A_L)_{opt} = \frac{1}{3} UA$ (为总传热系数的 $1/3$)。

3 类热机结构优化特性

热机的热力学优化研究思路和方法可以推广到其它非传统热机装置。存在有限势差(温度势差、化学势差、压力势差、电压势差等)的不可逆装置称为类热机装置(heat engine-like plants)^[3],这类对象均可用内可逆热机的分析方法,如图1(b)所示内可逆流体功率转换器(如压缩机、透平等装置)、内可逆等温化学机、图1(d)所示电路系统等装置。

有限压降流体流动不可逆性与有限温差传热不可逆性类比见文献[4~7]。文献[5,8]用内可逆热机的研究方法分析了线性和非线性流阻关系下流体流动的最大功率特性,研究表明:在线性流阻关系下,在总流阻一定 $R_1 + R_2 = CL$,最大输出功率时,流阻满足 $R_1 = R_2 = \frac{1}{2} CL$ 。

内可逆等温化学机、电路系统和生命系统等系统的研究表明^[9~13],在线性传输模型下均有与热机构形优化类似的特性。

广义热力学理论研究表明^[4],自然界存在守恒和耗散作用的物理系统均可用基于能量变换的广义多变过程来描述。因此,将传统的热机优化理论推广到各种广义热力学系统,建立设计和运行优化理论。机械、电、磁、化学、气动、生命、经济等过程和装置均可与传统热过程采取统一处理思想和方法进行分析和优化,将传统的热机有限时间热力学理论推广到各种广义热力学系统,建立设计和运行优化理论,其统一的研究思想可称为“广义热力学优化”理论^[4]。

广义热力学优化理论的实质是强调热力学、传热学、流体力学和机械、电、磁、化学反应动力学、生物学、经济学等专门领域知识的类比、交叉研究,寻求各种装置和过程最优性能和优化途径。其可能的研究对象包括:

(1) 化学反应和化学发动机,含电化学系统、催化聚合反应、燃烧反应、蒸馏系统、分离过程、燃料合成系统、等温内可逆化学机、广义内可逆化学机;

(2) 流体流动做功过程;

(3) 计算机逻辑运算过程;

(4) 生命过程,含肌肉收缩、肺部呼吸、心脏血液循环过程等;

(5) 基于统计理论的组合优化方法“模拟退火”最优构形;

(6) 经济过程,含贸易公司的运作等;

(7) 电机、电动机、电路系统(含大规模集成电路)设计。

4 数学描述及其论证

可以看出,上面这些结果都是立足于具体对象得到的,不是一种统一的理论,缺乏对传输过程内在物理机制深入研究和探讨,所得结果不具有普遍性。

基于此,下面将从非平衡态热力学基本理论出发,给出对线性不可逆传输过程都适用的普遍的构形优化关系式,从一般意义上证明上述类热机构形优化规律。

根据Gouy-Stodola定理:

$$W = W_{rev} - T_0 S_{gen}$$

对于热功能量转换过程,最小熵增对应过程系统的最大输出功率,最小熵产原理可以对做功能力进行优化。

为使问题具有一般意义,可将其抽象地描述为:对任意传输区域 V ,在势差 U 一定以及全场的传输系数的积分为定值条件下,寻求传输系数在区域的最优分布而使得传输系统具有最小熵产。

根据不可逆热力学^[15],对局部区域熵产,按连续分布,在 V 区域积分:

$$\int_V \sigma(r) dr = \int_V X(r) dr \circ \int_V J(r) dr \quad (1)$$

其中: $r = (x, y, z)$; $X(r)$ —热力学力; $J(r)$ —热力学流,流与力满足如下关系:

$$\int_V X(r) dr = \int_V R(r) dr \circ \int_V J(r) dr \quad (2)$$

由式(1)和式(2)有:

$$\int_V X(r) dr \int_V X(r) dr = \int_V R(r) dr \int_V \sigma(r) dr \quad (3)$$

定势差,则有:

$$\int_V X(r) dr = U \text{ (常数)}$$

唯象系数 $L(r)$ 与阻力系数 $R(r)$ 互为逆:

$$L(r) \circ R(r) = 1 \quad (4)$$

$L(r)$ 满足约束条件:

$$\int_V L(r) dr = K \text{ (常数)} \quad (5)$$

式(3)可写为:

$$\int_V \sigma(r) dr = \int_V \frac{U^2}{[1/L(r)] dr} \quad (6)$$

求最小熵产 $\int_V \sigma(r) dr$ 就相当于求 $\int_V [1/L(r)] dr$

的极大值。

构造函数 $y(r) = \int_0^r L(r) dr$, 上述优化问题就

转化为下式变分极值问题:

$$J[y(r)] = \int_V \frac{1}{y'(r)} dr \quad (7)$$

边界条件: $y(0)=0, y(V)=K$

求解极值为: $y(r) = \frac{K}{V} r$, 相应系数分布为:

$$L(r) = K/V$$

可见: $L(r)$ 分布为常数, 按区域等分。

其物理意义表示: 各传递系数按总约束传递系数等分可使系统具有最小熵产。

这一特征应用在诸如“广义热力学”对象之中, 不仅体现在生命系统也存在于非生命系统之中的优化结果^[6], 在此不赘述。

进一步发展趋势和潜力将主要体现在: “广义热力学”理论的建立、完善和发展。即, 一方面广泛采用内可逆模型以突出分析各种过程的主要不可逆性, 实现“内可逆性泛化”; 另一方面建立符合实际过程的复杂模型, 分析包括传输过程损失在内的各种不可逆性对实际性能的综合影响, 并优化其性能。亦即分析对象的广义化, 所获结果的普适性, “自然组织构形理论”的建立和发展^[13]。构形(Constructal)是与分形(Fractal)相对应, 强调结构形状的时间箭头效应而建立的新概念, 用以解释各种组织几何形状的热力学机制表述理论, 并用以改进各种组织、过程性能, 包括传热过程、传质过程、流体流动、电子元器件冷却系统、河岸形状、街道网络、植物的茎、叶、根形状的起源和经济结构网络等, 其中传热过程及电子元器件冷却系统构形优化问题将在另文中论述。

5 结论与展望

类热机概念将研究对象广义化, 同时传统的传热过程研究思想和方法也可用于研究类热机从而推广到各种广义热力学系统。

应用变分法和不可逆热力学原理给出了线性传

输过程构形优化特性的一般数学论证, 发现了一般线性传输过程构形优化特征及其规律。

本文分析仅是在考虑理想状况下所得结论, 更实际的情况是非线性传输过程, 还有待进一步的工作, 将理论分析与实验数据或工程数据进行比较以便与实际结合起来, 指导实践。

致谢: 本文得到海军工程大学陈林根教授指点, 在此表示感谢。

参考文献:

- [1] BEJAB A. Theory of heat transfer-irreversible power plants[J] . *Int J Heat Mass Transfer*. 1988 **31**(6): 1211—1219.
- [2] BEJAN A. Theory of heat transfer-irreversible power plants- II[J] . *Int J Heat Mass Transfer*. 1995, **38**(3): 433—444.
- [3] CHEN L G, WU C, SUN F R. Finite time thermodynamic optimization or entropy generation minimization of energy system[J] . *J Non-Equilibrium Thermodyn*. 1999, **24**(4): 327—359.
- [4] BEJAN A. Entropy generation minimization[M] . Boca Raton FL: CRC Press 1996.
- [5] BEJAN A. Maximum power from fluid flow[J] . *Int J Heat Mass Transfer*. 1996, **39**(6): 1175—1181.
- [6] RADCENO V. Generalized thermodynamics[M] . Bucharest: Editor Tehnica 1994.
- [7] CHEN L, WU C, SUN F. Performance characteristic of fluid flow convectors[J] . *J of the Institute of Energy*. 1998, **71**: 209—215.
- [8] CHEN L, BI Y, WU C. Influence of nonlinear flow resistance relation on the power and efficiency from fluid flow[J] . *J Phys D: Appl Phys*. 1999 **32**(12): 1346—1349.
- [9] CHEN L, SUN F, WU C, *et al.* Performance characteristics of isothermal chemical engines[J] . *Energy Convers & Mgmt* 1997, **38**(18): 1834—1841.
- [10] GORDON J M. Maximum work from isothermal chemical engines[J] . *J Appl Phys*. 1993, **73**(1): 8—11.
- [11] BEJAN A. Maximum work from an electric battery model[J] . *Int J Energy*. 1997, **22**(1): 93—102.
- [12] BEJAN A. Theory of organization in nature: pulsating physiological processes[J] . *Int J Heat Mass Transfer*. 1997, **40**(9): 2097—2104.
- [13] BEJAN A. Shape and structure from engineering to nature[M] . UK: Cambridge University Press, 2000.
- [14] CHEN L G, WU C, SUN F R. The recent advances in finite time thermodynamics and its future application[J] . *Int J Energy, Environment and Economics*. 2004, **11**(1): 69—81.
- [15] FORLAND K S, FORLAND T, KJELSTRUP R. Irreversible thermodynamics theory and application[M] . Chichester 1986.
- [16] BEJAN A, TONDEUR D. Equipartition, optimal allocation, and the constructal approach to predicting organization in nature[J] . *Rev Gen Therm*. 1998, **37**: 165—180.

(辉 编辑)

Key words: sludge, pyrolysis, mechanism function

汽轮发电机组远程智能故障诊断系统= **An Intelligent Remote Fault-diagnosis System for a Turbogenerator Set** [刊, 汉] HE Qing, DU Dong-mei, LI Hong (Education Ministry Key Laboratory on Condition Monitoring and Control of Power Plant Equipment Affiliated to Energy and Power Engineering College under the North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(5). — 532 ~ 535

Analyzed and studied are the techniques of intelligent fault diagnosis of vibration for turbogenerator sets. By combining artificial neural network technology with object-oriented one, a four symptom neural network has been established. The four symptoms are vibration frequency spectrum, axial-center trajectory, speeding-up-and-down characteristics and load characteristics. Meanwhile, constructed was an intelligent fault-diagnosis neural network for sensing vibrations of steam turbogenerator sets with incomplete symptom inputs. With the frequency spectrum symptoms of turbogenerator set vibrations serving as an example, a method for the automatic acquisition of frequency spectrum symptoms was studied and a specific case was given of comprehensive fault diagnosis with an incomplete symptom based on the frequency spectrum symptom. On this basis, by using a Browser Server mode and Java technology, an intelligent remote fault-diagnosis system for turbogenerator sets was developed along with a description of the structure composition of the system, functional modules, servers and client-terminal program design and implementation method. **Key words:** turbogenerator set, vibration, neural network, intelligent fault diagnosis, remote diagnosis

类热机结构优化特征及其论证= **Structure Optimization Features of Quasi-heat Engines and Their Demonstration Justification** [刊, 汉] ZHANG Xiao-hui (Thermal Energy Department of the Soochow University, Suzhou, China, Post Code: 215006) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(5). — 536 ~ 538

Based on the analysis of the configuration optimization characteristics of an existing heat engine and a quasi-heat engine device, the model of a quasi-heat engine has been extended to a general transmission-process model. Through a variational method, the configuration optimization criterion for general transmission processes was derived, proving that with respect to a linear transmission model and under the condition of a finite-dimension constraint, with the entropy production in the transmission process (or device) being at its minimum, an equipartition of the configuration will be its basic characteristics. In the meanwhile, also described is the application of the configuration optimization of transmission processes in the analysis of quasi-heat engines and in the study of generalized thermodynamics optimization theory. Moreover, the configuration optimization feature under discussion has been preliminarily verified along with a brief exposition of the development trend of its applications. **Key words:** engineering thermodynamics, quasi-heat engine, transmission process, configuration optimization

彼尔姆发动机制造联合体的燃气轮机技术= **Gas Turbine Technology of Perm Engine Manufacturing Complex** [刊, 汉] ALEXANDER Yinojamchef, DANIYL Sulimof (“Perm Engine Manufacturing Complex Stock Corp”. Managine Company, Perm, Russia, Post Code: 614000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(5). — 539 ~ 540

Key words: gas turbine; performance; power plant