

传热规律对卡诺热机有限时间 经济最优性能的影响

海军工程学院 陈林根 孙丰瑞 陈文振

【摘要】 本文导出了内可逆卡诺热机的最佳效率、利润率普遍关系，并藉此讨论了三种常见传热规律时内可逆卡诺热机的有限时间 经济最优性能，得到了一些新的普适结果。

一、前 言

经典热力学追求热机的高效率，得到工作于温度分别为 T_H 、 T_L ($T_H > T_L$) 的两热源间热机的可逆效率界限 $\eta_c = 1 - T_L/T_H$ 。由于 η_c 的不可达，以及获得 η_c 以零功率输出为代价，故 Curzon 和 Ahlborn^[1] 导出了热源 T_R 与工质 T_W 间线性传热 $q = \alpha (T_R - T_W)$ 条件下最大功率输出时卡诺热机的效率界限为 $\eta_{ca} = 1 - (T_L - T_H)^{0.5}$ ，并由此开创了一个现代热力学新分支，有限时间热力学。自 1975 年以来，已有大量文献研究了热机、两源和三源热泵、制冷机的有限时间最优性能，且其研究大多基于线性传热规律，得到了线性传热条件下热机的有限时间热力学性能界限^[1,2]、优化关系^[3]和参数选择准则^[4]。近年来也有一些作者研究了其它传热规律时各种热力循环的最优性能，如研究了 $q = \alpha (T_R^{1/n} - T_W^{1/n})$ 时热机、两源热泵、三源热泵和三源制冷机的性能，研究了 $q = \alpha (T_R^n - T_W^n)$ 时热机和两源制冷机的性能；研究了

$$q = \alpha (T_R - T_W)^n \quad (1)$$

时热机和两源制冷机的性能。有限时间热力学的特点是强调性能系数与热力学输出率的协调。但实际热力系统工作时并不一定以热力学输出率（如：功率，制冷率，供热率）为追求目标，比较实际的是以系统运行的利润率最大为目标。在 Salamon 和 Nitzan^[5] 工作的基础上，本文作者将有限时间热力学与经济优化相结合，提出有限时间 经济分析法，研究热机和制冷机等热力系统的有限时间最优性能，获得一些特定传热规律下的有限时间 经济性能界限、优化关系和参数选择准则。显然，与有限时间热力学研究结果一样，传热规律对有限时间 经济分析结果有很大影响。因为式 (1) 所示的传热规律是一类较普遍的关系式，如包括牛顿传热定律（线性传热， $n=1$ ），不可逆热力学中的线性唯象定律（ $n=-1$ ），热辐射定律（ $n=4$ ）等，因此本文以其为基础，研究热机的利润率、效率关系，藉此可得较为普遍的结果。

二、最佳效率、利润率关系

考虑工作于 T_H 、 T_L 热源间的内可逆卡诺热机，设工质与高、低温热源间的传热系数分别为 α 、 β ，传热服从式 (1) 所示规律，则工质的吸、放热量分别为 $Q_1 = \alpha (T_H^n - T_W^n) t_1$ ，

$Q_2 = \beta (T_{WH}^n - T_L^n) t_2$, 式中 T_{WH} 、 T_{WL} 分别为工质的吸、放热温度, t_1 、 t_2 分别为工质的吸、放热时间。忽略两个绝热过程的时间, 则循环的周期为 $\tau = t_1 + t_2$, 循环的效率为 $\eta = 1 - Q_2/Q_1 = 1 - T_{WL}/T_{WH}$, 循环的输出功为 $W = Q_1 - Q_2$ 。

设热机的工作环境温度为 T_o , 则相同初、终条件下热机所能作出的可逆功为

$$W_{rev} = Q_1(1 - T_o/T_H) - Q_2(1 - T_o/T_L) = Q_1\epsilon_1 - Q_2\epsilon_2 \quad (2)$$

式中 $\epsilon_1 = 1 - T_o/T_H$, $\epsilon_2 = 1 - T_o/T_L$, 分别为吸、放热量的卡诺系数。

设热机的输出功价格为 ψ_P , 而输入 价格为 ψ_A , 则热机输出功收益率 R 和输入 费用率 C 分别为 $R = \psi_P W / \tau$, $C = \psi_A A / \tau = \psi_A W_{rev} / \tau$ 。

热机循环的利润率定义为输出功收益率与输入 费用率之差, 则循环的利润率为

$$\begin{aligned} \Pi &= R - C = [\psi_P - \psi_A \epsilon_1] Q_1 - (\psi_P - \psi_A \epsilon_2) Q_2 \gamma \tau \\ &= \frac{\alpha \psi_P [1 - \epsilon_1 \psi_A / \psi_P] - (1 - \epsilon_2 \psi_A / \psi_P)(1 - \eta)}{(T_H^n - T_{WH}^n)^{-1} + \delta^2(1 - \eta) T_{WH}^n (1 - \eta)^n - T_L^n} \gamma \tau \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $\delta = (\alpha \beta)^{0.5}$ 。根据极值条件 $(\partial / \partial T_{WH}) \Pi = 0$ 或 $(\partial \Pi / \partial T_{WH}) \eta = 0$, 由式 (3) 可求出给定利润率时的最佳效率或给定效率时的最佳利润率。实际上, 上述两个极值条件是一致的, 故两者均可应用于式 (3)。由 $(\partial \Pi / \partial T_{WH}) \eta = 0$ 可有

$$\begin{aligned} T_{WH}^{2n} (1 - \eta)^{n+1} \delta^2 - (1 - \eta)^{n+1} \gamma + 2 T_{WH}^n (1 - \eta)^n T_L^n - \delta^2 (1 - \eta) T_H^n \gamma \\ + \delta^2 (1 - \eta)^{n+1} T_H^{2n} - T_L^{2n} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

式 (4) 的解为

$$T_{WH}^{n, Opt} = \delta T_H^n + T_L^n / (1 - \eta)^{(n+1)/2} \gamma \delta + (1 - \eta)^{(n-1)/2} \gamma \quad (5)$$

相应的工质最佳放热温度为

$$T_{WL}^{n, Opt} = \delta T_H^n (1 - \eta)^n + T_L^n (1 - \eta)^{(n-1)/2} \gamma \delta + (1 - \eta)^{(n-1)/2} \gamma \quad (6)$$

将式 (5) 代入 (3) 即可得给定效率与最佳利润率间的关系, 也即给定利润率与最佳效率间的关系

$$\Pi_m = \frac{\alpha \psi_P [T_H^n - T_L^n / (1 - \eta)^n] [1 - \epsilon_1 \psi_A / \psi_P] - (1 - \epsilon_2 \psi_A / \psi_P)(1 - \eta)}{1 + \delta (1 - \eta)^{(1-n)/2} \gamma^2} \quad (7)$$

式 (7) 表明, 当 $\eta = 1 - T_L/T_H = \eta_c$ 或 $\eta = 1 - (1 - \epsilon_1 \psi_A / \psi_P) / (1 - \epsilon_2 \psi_A / \psi_P)$ 时, 利润率为零。这表明内可逆卡诺循环的利润率存在极值。由式 (7) 和极值条件 $d\Pi_m / d\eta = 0$ 可得到最大利润率时的效率界限 η_m 的方程为

$$\begin{aligned} (1 - \epsilon_2 \psi_A / \psi_P) T_H^n (1 - \eta_m)^{(3n+1)/2} + n \delta (1 - \epsilon_2 \psi_A / \psi_P) T_H^n (1 - \eta_m)^{n+1} \\ - (n - 1) \delta (1 - \epsilon_1 \psi_A / \psi_P) T_H^n (1 - \eta_m)^n + (n - 1) (1 - \epsilon_2 \psi_A / \psi_P) T_L^n (1 - \eta_m)^{(n+1)/2} \\ - n (1 - \epsilon_1 \psi_A / \psi_P) T_L^n (1 - \eta_m)^{(n-1)/2} - \delta (1 - \epsilon_1 \psi_A / \psi_P) T_L^n = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

式 (8) 给出的 η_m 既不同于经典热力学可逆效率界限, 也不同于有限时间热力学界限 (最大功率输出时的效率界限), 作者将其称为有限时间 经济性能界限。 η_m 不仅与热源温度 T_H 、 T_L 有关, 而且还与环境温度 T_o 、传热系数比 $\delta = (\alpha \beta)^{0.5}$ 和输入 与输出功价格比 ψ_A / ψ_P 有关。

为了保证热力过程能够盈利, 须有 $\psi_P > \psi_A$, 因为一单位价值 输入至少应该产生一单位价值的功输出, 所以有 $0 < \psi_A / \psi_P < 1$ 。为了明了物理本质, 这里讨论两种极限情况。

当输出功价格远大于输入 价格, 即 $\psi_P \gg \psi_A$ 时, 可有 $\psi_A / \psi_P \rightarrow 0$, 则式 (7) 成为

$$\Pi_m = \psi_P P \quad (9)$$

式中 P 为给定效率时的最佳功率输出^[8]

$$P = \alpha \eta [\eta_H^n - T_L^n / (1 - \eta)^n] / \{1 + \delta(1 - \eta)^{(1-n)/2}\} \quad (10)$$

即此时最佳利润率目标已转化为最佳功率输出目标, 而式 (8) 给出的 η_m 即为有限时间热力学界限。

当输出功价格接近于输入 价格, 即 $\psi_A/\psi_P \rightarrow 1$ 时, 式 (7) 成为

$$\Pi_m = - \frac{\psi_P \alpha \Gamma_o [\eta_H^n - T_L^n / (1 - \eta)^n] [\eta_H(1 - \eta) - T_L]}{T_H T_L \{1 + \delta(1 - \eta)^{(1-n)/2}\}} \quad (11)$$

而由式 (10) 可得循环的熵产率 σ 为

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{\Delta S}{\tau} = \frac{Q_1}{\tau} \left(\frac{1 - \eta}{T_L} - \frac{1}{T_H} \right) = \frac{P}{\eta} \left(\frac{1 - \eta}{T_L} - \frac{1}{T_H} \right) \\ &= \frac{\alpha [\eta_H^n - T_L^n / (1 - \eta)^n] [\eta_H(1 - \eta) - T_L]}{T_H T_L \{1 + \delta(1 - \eta)^{(1-n)/2}\}} \end{aligned} \quad (12)$$

比较式 (12)、(11) 可知

$$\Pi_m = - \psi_P T_o \sigma = - \psi_P T_o \Delta S / \tau \leq 0 \quad (13)$$

即此时最大利润率目标已转化为最小熵产率目标, 也即最小 损失 ($T_o \Delta S$) 目标。因为 $\Delta s \geq 0$, 故由式 (13) 可知, 无论在什么效率下工作, 热机均不可能盈利。仅当 $\eta = \eta_c$ 时, 收益才与投入成本相当, 利润率达到最大值为零。此时的效率界限为 $\eta_m = \eta_c$ 。

由上述讨论可见, 有限时间 经济性能界限介于有限时间热力学性能界限和可逆性能界限之间, 并且通过价格比与后两者相关联, 以后两者为上、下极限值。这一结论适合于各种传热规律, 具有普适性。

三、三种常用传热规律下的 η 和 Π_m 关系

这里讨论三种特殊传热规律时的最佳效率、利润率关系, 即 $n = 1$, $n = -1$ 和 $n = 4$ 。

1. $n = 1$ 情况 式 (7) 可化为

$$\Pi_m = \frac{\alpha \psi_P}{(1 + \delta)^2} \left(T_H - \frac{T_L}{1 - \eta} \right) \{1 - \epsilon_1 \psi_A / \psi_P - (1 - \epsilon_2 \psi_A / \psi_P)(1 - \eta)\} \quad (14)$$

而由式 (8) 可得

$$\eta_m = 1 - (T_L / T_H)^{1/2} \{1 - \epsilon_1 \psi_A / \psi_P / (1 - \epsilon_2 \psi_A / \psi_P)\}^{1/2} \quad (15)$$

最大利润率则为

$$\Pi_{max} = \frac{\alpha \psi_P}{(1 + \delta)^2} \{ [\eta_H(1 - \epsilon_1 \psi_A / \psi_P)]^{1/2} - [\eta_L(1 - \epsilon_2 \psi_A / \psi_P)]^{1/2} \}^2 \quad (16)$$

定义两个特征参数 r 和 θ ^[3]

$$(T_L / T_H)^r = T_{WL} / T_{WH}, \quad 0 \leq r \leq 1 \quad (17)$$

$$\theta = (T_{WH} - T_H^r T_L^{1-r}) / (T_H - T_H^r T_L^{1-r}), \quad 0 \leq \theta \leq 1 \quad (18)$$

则由 $n = 1$ 和式 (17)、(18) 可将式 (3)、(14) 写为

$$\Pi = \frac{\alpha \{ (\psi_P - \psi_A \epsilon_2) \{1 - (T_L / T_H)^r\} - (\epsilon_1 - \epsilon_2) \psi_A \}}{(T_H - T_{WH})^{-1} + \delta^2 (T_{WH} - T_H^r T_L^{1-r})^{-1}} \quad (19)$$

$$\Pi_m = \alpha \psi_P / (1 + \delta)^2 \cdot T_H \{1 - (T_L / T_H)^{1-r}\} \{1 - \epsilon_1 \psi_A / \psi_P - (1 - \epsilon_2 \psi_A / \psi_P)(T_L / T_H)^r\} \quad (20)$$

$$\psi = \Pi / \Pi_m = (1 + \delta)^2 (1 - \theta) \theta / \{ \delta^2 (1 - \theta) + \theta \} \quad (21)$$

当 $\theta = \theta_a$, $\theta = \delta / (1 + \delta)$ 时 $\psi = 1$, $\Pi = \Pi_m$ 。

当 $r = r_m$

$$r_m = 1/2\{1 + \ln \{1 - \epsilon_1 \psi_A / \psi_P\} / (1 - \epsilon_2 \psi_A / \psi_P)\} \ln(T_L / T_H) \} \quad (22)$$

有 $\Pi_m = \Pi_{max}$ 。参数选择的准则为

$$r_m \leq r < 1, \theta = \theta_a \quad (23)$$

式 (15)、(23) 为文献 [7] 的主要结果。

当 $\psi_A / \psi_P \rightarrow 0$ 时, 式 (14) 成为

$$\Pi_m = \psi_P P \quad (24)$$

式中 P 为线性传热时给定效率下的最佳功率

$$P = \alpha \psi_P / (1 + \delta)^2 \cdot \eta [T_H - T_L / (1 - \eta)] \quad (25)$$

而式 (15) 化为

$$\eta_m = 1 - (T_L / T_H)^{1/2} = \eta_{CA} \quad (26)$$

这是文献 [1] 的主要结果。式 (23) 化为

$$0.5 \leq r < 1, \theta = \theta_a \quad (27)$$

这是文献 [4] 的主要结果。

2. $n = -1$ 情况 当 $n = -1$ 时, 传热规律为不可逆热力学中的线性唯象定律, 此时 α 和 β 为负值。由式 (7) 和 (8) 可得

$$\Pi_m = \frac{\alpha \psi_P [T_L - T_H(1 - \eta)] \{1 - \epsilon_1 \psi_A / \psi_P\} - (1 - \epsilon_2 \psi_A / \psi_P)(1 - \eta)}{T_H T_L [1 + \delta(1 - \eta)]^2} \quad (28)$$

$$\eta_m = 1 - \frac{(1 - \epsilon_1 \psi_A / \psi_P) + 2\delta(1 - \epsilon_1 \psi_A / \psi_P) + (1 - \epsilon_2 \psi_A / \psi_P) T_L / T_H}{\delta(1 - \epsilon_1 \psi_A / \psi_P) + 2(1 - \epsilon_2 \psi_A / \psi_P) + \delta(1 - \epsilon_2 \psi_A / \psi_P) T_L / T_H} \quad (29)$$

$$\Pi_{max} = - \frac{\alpha \psi_P}{4T_L} \frac{\{1 - \epsilon_1 \psi_A / \psi_P\} - (1 - \epsilon_2 \psi_A / \psi_P) T_L / T_H}{\delta(1 - \epsilon_1 \psi_A / \psi_P) + (1 - \epsilon_2 \psi_A / \psi_P)(1 + \delta T_L / T_H)} \quad (30)$$

η_m 与 δ 有关。当 $\delta = 1$, $\delta = 0$ 和 $\delta \rightarrow \infty$ 时, 由式 (29) 有

$$\lim_{\delta \rightarrow 1} \eta_m = 1 - \frac{(1 - \epsilon_1 \psi_A / \psi_P) + \beta - (2\epsilon_1 + \epsilon_2) \psi_A / \psi_P T_L / T_H}{\beta - (\epsilon_1 + 2\epsilon_2) \psi_A / \psi_P + (1 - \epsilon_2 \psi_A / \psi_P) T_L / T_H} \quad (31)$$

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} \eta_m = \frac{1}{2} \left[2 - \frac{1 - \epsilon_1 \psi_A / \psi_P}{1 - \epsilon_2 \psi_A / \psi_P} - T_L / T_H \right] \quad (32)$$

$$\lim_{\delta \rightarrow \infty} \eta_m = \frac{(1 - \epsilon_1 \psi_A / \psi_P) - 1 - (2\epsilon_1 - \epsilon_2) \psi_A / \psi_P T_L / T_H}{(1 - \epsilon_1 \psi_A / \psi_P) + (1 - \epsilon_2 \psi_A / \psi_P) T_L / T_H} \quad (33)$$

当 $\psi_A / \psi_P \rightarrow 0$ 时, 式 (28) 成为

$$\Pi_m = \psi_P P \quad (34)$$

式中 P 为

$$P = \alpha [T_L - T_H(1 - \eta)] \{T_H T_L [1 + \delta(1 - \eta)]\} \quad (35)$$

而式 (29) 成为

$$\eta_m = 1 - [1 + (2\delta + 1) T_L / T_H] / \{(\delta + 2) + \delta T_L / T_H\} \quad (36)$$

式 (31)、(32) 分别化为

$$\eta_m = 1 - (1 + 3T_L / T_H) / (3 + T_L / T_H) \quad (37)$$

$$\eta_m = (1 - T_L / T_H) / 2 = \eta_{C/2} \quad (38)$$

式 (37)、(38) 分别为文献 [8、9] 的结果。

3. $n = 4$ 情况 当 $n = 4$ 时

$$\Pi_m = \frac{\alpha \psi_P [T_H^4 - T_L^4(1 - \eta)^4] \{1 - \epsilon_1 \psi_A / \psi_P\} - (1 - \epsilon_2 \psi_A / \psi_P)(1 - \eta)}{[1 + \delta / (1 - \eta)^{3/2}]^2} \quad (39)$$

而 η_m 可由下式求出

$$\begin{aligned} & (1 - \epsilon_2 \psi_A / \psi_P) T_H^4 (1 - \eta_m)^{13/2} + 4\delta(1 - \epsilon_2 \psi_A / \psi_P) T_H^4 (1 - \eta_m)^5 \\ & - 3\delta(1 - \epsilon_1 \psi_A / \psi_P) T_H^4 (1 - \eta_m)^4 + 3(1 - \epsilon_2 \psi_A / \psi_P) T_L^4 (1 - \eta_m)^{5/2} \\ & - 4(1 - \epsilon_1 \psi_A / \psi_P) T_L^4 (1 - \eta_m)^{3/2} - \delta(1 - \epsilon_1 \psi_A / \psi_P) T_L^4 = 0 \end{aligned} \quad (40)$$

当 α 有限, $\beta \rightarrow \infty$, 即工质与高温热源间有不可逆传热, 而与低温热源可逆耦合时, $\delta \rightarrow 0$, 由式 (39) 有

$$\Pi_m = \alpha \psi_p [T_H^4 - T_L^4(1 - \eta)^4] \{ (1 - \epsilon_1 \psi_A / \psi_p) - (1 - \epsilon_2 \psi_A / \psi_p)(1 - \eta) \} \quad (41)$$

此时的效率界限为 $\eta_m = 1 - T_L / T_{WH}$, T_{WH} 可由下式求出

$$4(1 - \epsilon_1 \psi_A / \psi_p) T_{WH}^5 - 3(1 - \epsilon_2 \psi_A / \psi_p) T_L T_{WH}^4 - (1 - \epsilon_2 \psi_A / \psi_p) T_H^4 T_L = 0 \quad (42)$$

上两式对太阳能转换系统是十分有用的最佳利润率计算公式。当 $\psi_A / \psi_p \rightarrow 0$ 时, 式 (42) 化为

$$4T_{WH}^5 - 3T_L T_{WH}^4 - T_H^4 T_L = 0 \quad (43)$$

四、讨 论

1. 本文导出的最佳效率、利润率关系和最大利润率时的效率界限包含了有限时间热力学优化关系、性能界限和经典热力学界限, 这是有限时间热力学与经济优化相结合的结果, 因此称这种研究为有限时间经济分析, 相应的性能界限、优化关系和参数优化准则称为有限时间经济性能界限、优化关系和优化准则。

2. 若用热经济学中的热经济效益率作为本文的价格比 ψ_A / ψ_p , 则所得最优性能不仅包括了能量的价值和价格问题, 而且还包括了设备投资费用率等其它经济因素, 更加全面地反映了热机循环的最优热经济性能。

3. 本文的研究表明, 虽然不同的传热规律 (不同的 n 值) 对内可逆卡诺循环的性能有很大影响, 但最佳效率、利润率间的关系是普遍存在的, 且均存在一个最大利润率点和两个零利润率点。不同的传热规律仅改变最大利润率点的位置。

4. 本文导出了多种传热规律下的有限时间经济最优关系的统一表达式, 所得优化关系和性能界限具有普适性, 对提高实际热机的经济性有指导作用。

5. 若将有限时间热力学与现代热力学中的其它几个分支, 如热经济学, 不可逆过程热力学等相结合, 可望开拓广阔的理论研究前景, 获得更加统一的普适结果, 并能对实际热机和其它热力系统的设计、运行起到更符合物理本质的指导作用。作者的一系列研究已经证实了这种展望的现实性。

参 考 文 献

- [1] Curzon, F. L. and Ahlborn, B., "Efficiency of A Carnot Engine at Maximum Power Output", Am. J. Phys., 43, 1, 1975.
- [2] Gordon, J. M., "Maximum Power Point Characteristics of Heat Engines as A General Thermodynamic Problem", Am. J. Phys., 57, 12, 1989.
- [3] 孙丰瑞、赖锡棉, "热源间热机的全息热效率功率谱", 热能动力工程, 3, 3, 1988.
- [4] 陈文振、孙丰瑞、陈林根, "热源间热机热工参数选择的有限时间热力学准则", 科学通报, 35, 3, 1990.
- [5] Salamon, P. and Nitzan, A., "Finite Time Optimization of A Newton's Law Carnot Cycle", J. Chem. Phys., 74, 6, 1981.
- [6] Chen, L. and Yan, Z., "The Effect of Heat-Transfer Law on The Performance of A Two-Heat-Source Endoreversible Cycle", J. Chem. Phys., 90, 7, 1989.
- [7] 陈林根、孙丰瑞、陈文振, "两源热机有限时间经济性能界限和优化准则", 科学通报, 36, 4, 1991。(待发表)
- [8] Orlov, V. N., "Optimum Irreversible Carnot Cycle Containing Three Isotherms", Sov. Phys. Dokl., 30, 6, 1985.
- [9] Vos, A. D., "Efficiency of Some Heat Engines at Maximum Power Conditions", Am. J. Phys., 53, 6, 1985.

laminar flow to fully turbulent flow over a flat plate is given

NUMERICAL SIMULATION OF 3-D VISCOUS FLOW IN NON-AXISYMMETRIC NOZZLE

Ji Yongchun (*Tsinghua University*)

Ma Tieyou and Cui Jiya (*Beijing University of Aeronautics and Astronautics*)

ABSTRACT

The three-dimensional viscous flow in non-axisymmetric nozzle are simulated numerically. MacCormack finite difference scheme is extended to solving three-dimensional Navier-Stokes equations. Local time step technique is adopted in numerical iteration for rapid convergence. The computer memory and CPU time are saved by proper programming. Two examples of simulation are presented. Favorable agreement is shown between computed and measured surface static pressure distributions.

EFFECT OF HEAT-TRANSFER LAW ON FINITE-TIME EXERGoeCONOMIC OPTIMAL PERFORMANCE OF A CARNOT ENGINE

Chen Lingen, Sun Fengrui, Chen Wenzhen

(*Naval Academy of Engineering*)

ABSTRACT

The relationship between optimal efficiency and profit of an endoreversible carnot engine is derived. According to this relationship the finite-time exergoeconomic optimal performance of the engine has been considered for three common heat-transfer laws. A number of new universal conclusions have been drawn therefrom.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON LIQUID-COOLING MECHANISM FOR TURBINE VANE

Liu Dezhang and Ouyang Ning (*Nanjing Aeronautical Institute*)

ABSTRACT

The experimental investigation on liquid cooling mechanism was carried out with water through an even-heated adiabatic straight pipe. The flow pattern, the heat transfer coefficient along full-flow-path, and the correlation between them, have been studied. In order to imitate the actual working conditions of the cooling passage of turbine vane, the heat transfer flux, the coolant inlet parameters, and the pipe angle are changeable. Some empirical formulas for come-to-saturated point Z^B and come-annular point Z^N have been derived and several useful conclusions have been drawn for engineering application.