

# 振荡热管传热性能的试验设计与多因素分析

马永锡, 张 红

(南京工业大学 机械与动力工程学院, 江苏 南京 210009)

**摘 要:** 振荡热管的传热受许多因素的影响, 其传热性能与因素间的关系是复杂和非线性的。采用统计方法分析铜-水闭合回路振荡热管传热性能与充液率、倾角、热量输入间关系。首先应用中心复合设计对试验进行安排, 然后采用最小二乘法拟合试验变量与响应间关系, 最后采用方差分析研究 3 个因素及其交互影响的程度。结果显示: 二阶方程模型较好地反映了传热功率与影响因素间的关系; 3 个因素对传热功率的影响都是显著的, 其中倾角的影响最为显著, 但它们的交互影响不明显; 在研究的范围内, 最佳充液率和最佳倾角随加热水流量的增大均有所增加。

**关 键 词:** 振荡热管; 中心复合设计; 方差分析

中图分类号: TK172.4 文献标识码: A

## 1 前 言

振荡热管是一种新型独特的传热元件<sup>[1]</sup>, 在一封闭的弯曲毛细管中, 充有一定量的工作介质, 该介质在冷热端温差及表面张力的作用下形成汽液塞状流随机地出现在管路中, 通过相变和液塞的振荡实现热传递。其传热现象集沸腾、蒸发、冷凝、脉冲振荡于一体, 这些物理过程并非是彼此孤立和简单地叠加, 而是一个有机互动整体过程, 到目前为止人们还不能清楚地解释其机理。过去, 文献 2~4] 研究不同因素对振荡热管传热性能的影响仅限于单个因素的分析。本文将利用试验设计、模型拟合、多因素方差分析等统计方法研究铜-水闭合回路振荡热管的充液率、倾角、热量输入与传热功率间的关系及影响程度。

## 2 中心复合试验设计

由于响应与自变量之间的关系形式通常是未知的, 所以第一个步骤就是寻求响应和自变量集合之间的真实函数关系的一个合适的逼近式。对较为复杂的问题通常选用二阶模型:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 \quad (i < j) \quad (1)$$

式中:  $y$ —响应;  $x_i$ —变量的线性影响;  $x_i x_j$ —变量的交互影响;  $x_i^2$ —变量的二次影响。

中心复合设计是应用最为广泛的二阶模型设计<sup>[5]</sup>, 由  $2^k$  析因设计(规范为通常的  $\pm 1$  记号)添加上  $2^k$  个坐标轴点  $(\pm\alpha, 0, 0, \dots, 0)$ ,  $(0, \pm\alpha, 0, \dots, 0)$ ,  $(0, 0, \pm\alpha, \dots, 0)$ ,  $(0, 0, 0, \dots, \pm\alpha)$  和  $n_0$  个中心点  $(0, 0, 0, \dots, 0)$  所组成。Box 和 Draper 给出了  $\alpha$  的计算式<sup>[6]</sup>(见式(2)), 恰当选择  $\alpha$  可以使得中心复合设计是可旋转的, 可旋转性对于响应曲面的优化是非常重要的, 因为最优点的位置在试验之前是未知的, 可旋转性就在于所使用的设计在各个方向上提供等精度的估计。恰当选择中心点的个数可以使得中心复合设计是一致精度的设计, 在一致精度的设计中  $y$  在中心点的方差等于  $y$  在与原点为一个单位距离处的方差, 因此更能防止回归系数的偏差。同时在中心点处重复试验, 可以估计随机测量响应的可靠性以及检验参差的统计显著性。

$$\alpha = \left[ \frac{k(1 + n_{s0}/n_s)}{1 + n_{c0}/n_c} \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中:  $k$ —因素个数;  $n_{s0}$ —析因区组内的中心点数;  $n_s$ —析因区组内的非中心点数;  $n_{c0}$ —坐标轴点区组内的中心点数;  $n_c$ —坐标轴点区组内的非中心点数。

## 3 试 验

### 3.1 试验描述

试验热管为铜-水闭合回路振荡热管, 外径 3 mm, 内径 2 mm, 10 个回转通道, 展开总长 1.85 m, 加热段、绝热段和冷凝段长度均为 60 mm。试验系统装置如图 1 所示; 保温良好的振荡热管安装在角度可调的支架上; 采用底端加热的方式, 来自恒温水槽的 80 °C 热水为热源, 流量  $V_h$  可调, 由转子流量计(量程 0~30 L/h)计量; 冷却段由来自高位水槽 23 °C 的室温水进行冷却, 流量恒定  $V_c = 30$  L/h; 用铜-

收稿日期: 2005-05-25; 修订日期: 2005-07-27

基金项目: 江苏省教育厅自然科学基金资助项目(02KJB470001)

作者简介: 马永锡(1975-), 男, 山东高密人, 南京工业大学博士研究生。

康铜(T型)热电偶测量冷热段进出口的水温, 测量

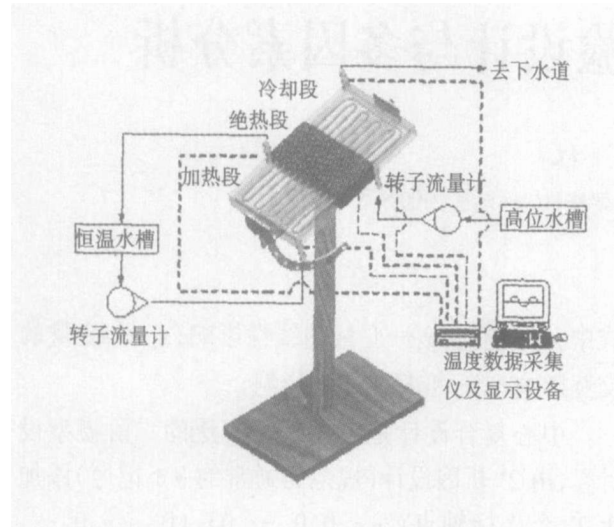


图 1 试验系统装置示意图

的温度通过数据采集仪 (HP 34970A) 传到计算机记录并保存。所测量的变量为冷热段出口水温  $T_c^{out}$ 、 $T_c^{in}$  和加热水流量  $V_h$ 。传输功率  $Q$  (单位: W) 由下式确定:

$$Q = \frac{V_c \rho c_p (T_c^{out} - T_c^{in})}{3\ 600\ 000} \quad (3)$$

式中:  $c_p$ —冷却水的比热,  $J/(kg \cdot ^\circ C)$ ;  $\rho$ —冷却水密度,  $kg/m^3$ ;  $V_c = 30\ L/h$ ;  $T_c^{in} = 23\ ^\circ C$ ; 由于冷却水出口的温度  $T_c^{out}$  是波动的, 取振荡热管稳定工作后 2 min 内的平均温度  $T_c^{out}$  为出口温度。

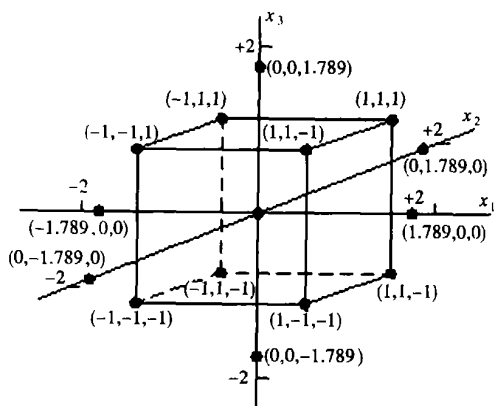


图 2  $k=3$  的中心复合设计

### 3.2 试验设计

利用上述试验系统装置对 3 个影响振动热管传热功率的因素进行研究, 它们是: 充液率  $\psi$  范围为 30%~70%; 倾角  $\phi$ , 范围为  $0^\circ \sim 90^\circ$ ; 热量输入由调节热水流量  $V_h$  来控制, 范围为 5~30 L/h。

采用三因素标准中心复合设计对上述试验条件安排了 16 次试验, 并划分为析因区组和坐标轴点区组两个区组, 每个区组各增加一次相同的中心点试验, 因此总共设计试验次数为 18 次。由上可知:  $k=3$ ,  $n_c=8$ ,  $n_{a0}=2$ ,  $n_s=6$ ,  $n_{a0}=2$ , 根据式 (2),  $\alpha=1.789$ 。设计如图 2 所示, 完整的数据组列入表 1, 其中自然变量是根据规范变量经变换得到:  $\psi=50\%+10\%x_1$ ,  $\phi=45+25x_2$ ,  $V_h=16.5+5x_3$ 。

表 1 试验设计及试验结果

区组	规范变量			自然变量			响应 $Q/W$
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\psi/\%$	$\phi/^\circ$	$V_h/L \cdot h^{-1}$	
1	1	-1.000	-1.000	40	20	11.5	84.5
2	1	-1.000	1.000	40	20	21.5	102.3
3	1	-1.000	1.000	40	70	11.5	125.5
4	1	-1.000	1.000	40	70	21.5	155.1
5	1	1.000	-1.000	60	20	11.5	97.2
6	1	1.000	-1.000	60	20	21.5	121.4
7	1	1.000	1.000	60	70	11.5	146.6
8	1	1.000	1.000	60	70	21.5	176.8
9(C)	1	0.000	0.000	50	45	16.5	144.3
10(C)	1	0.000	0.000	50	45	16.5	146.6
11	2	-1.789	0.000	32	45	16.5	104.2
12	2	1.789	0.000	68	45	16.5	147.6
13	2	0.000	-1.789	50	0	16.5	54.1
14	2	0.000	1.789	50	90	16.5	156.4
15	2	0.000	0.000	50	45	7.5	117.8
16	2	0.000	0.000	50	45	25.5	171.6
17(C)	2	0.000	0.000	50	45	16.5	143.4
18(C)	2	0.000	0.000	50	45	16.5	146.1

### 4 结果与分析

用最小二乘法对表 1 中的自然变量数据拟合二阶模型, 得:

$$Q = -153.4 + 653.5 \psi + 2.27 \phi + 1.35 V_h - 601.7 \phi^2 - 0.02 \psi^2 - 0.009 V_h^2 + 0.55 \psi \phi + 1.75 \psi V_h + 0.018 \phi V_h \quad (4)$$

此模型的方差分析见表 2, 由于两个区组各添加了一次中心的试验(表 1 标记 C 的编号), 重复试验用来估计纯误差和检验拟合不足的显著性, 结果显示: 拟合不足不显著 ( $P > 0.05$ ), 因此该模型近似反映了响应与变量间真实的关系。  $\phi$ 、 $\psi$  和  $V_h$  3 个因素的线性影响(标记 L)及  $\phi$ 、 $\psi$  的二次影响(标记 Q)都是统计显著的 ( $P < 0.05$ ), 而 3 个因素的交互影响不显著, 仅有  $\phi$  和  $V_h$  的交互影响 ( $2L \times 3L$ ) 是边际显著的 ( $0.05 < P < 0.1$ )。另一个确定因素影响程度的方法是采用 Pareto 影响图, 如图 3 所示。该图采用影响估计的绝对值清楚地表明了线性影响、二次影响和交互影响的大小, 并进行排序, 图中的竖线 ( $P = 0.05$ ) 代表统计显著的边界, 振荡热管的传输功率的主要影响由大到小依次是  $\phi$  的线性影响、 $V_h$  的线性影响、 $\phi$  的二次影响、 $\psi$  的线性影响和  $\psi$  的二次影响。

表 2 二阶模型的方差分析结果

因素	平方和	自由度	均方	F 函数值	P-水平
组	0.42	1	0.42	0.132	0.750 737
(1) $\psi(L)$	1 610.73	1	1 610.73	512.156	0.001 947 *
$\psi(Q)$	557.63	1	557.63	177.307	0.005 593 *
(2) $\phi(L)$	10 116.71	1	10 116.71	3 216.759	0.000 311 *
$\phi(Q)$	2 364.63	1	2 364.63	751.869	0.001 327 *
(3) $V_h(L)$	2 724.99	1	2 724.99	866.451	0.001 152 *
$V_h(Q)$	0.71	1	0.71	0.225	0.681 776
1 L × 2 L	15.13	1	15.13	4.809	0.159 595
1 L × 3 L	6.13	1	6.13	1.948	0.297 608
2 L × 3 L	39.60	1	39.60	12.593	0.071 050
拟合不足	96.02	5	19.20	6.106	0.146 681
纯误差	6.29	2	3.14	—	—
总和	17 334.66	17	—	—	—

注: \* 表示统计显著。

从表 2 中还可以看出区组的影响和  $V_h$  的二次影响相对小, 因此它们的影响可以忽略, 式 (4) 可简化为:

$$Q = -153.4 + 653.5 \psi + 2.27 \phi + 1.35 V_h - 601.7 \phi^2 - 0.02 \psi^2 + 0.55 \psi \phi + 1.75 \psi V_h + 0.018 \phi V_h \quad (5)$$

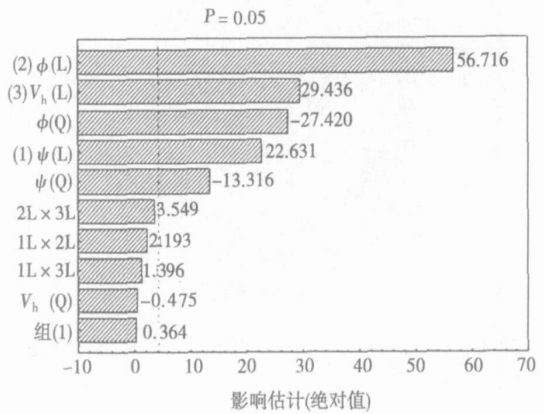


图 3 Pareto 影响图

在设计和应用场合, 人们所关心的是在不同的热量输入情况下所对应的最佳充液率、最佳倾角以及最大传输功率。为此, 假定  $V_h$  为定值, 求解式 (5) 在稳定点下的最大响应, 结果列入表 3。在  $V_h$  为 5 ~ 30 L/h 的范围内, 最佳充液率和最佳倾角均随加热水流量的增大而增大。图 4 通过三维曲面和等高线表达了  $V_h = 16.5$  L/h 时传输功率  $Q$  与影响因素  $\psi$ 、 $\phi$  间的关系, 图中显示: 倾角对传热功率的影响比充液率敏感; 较为合理的充液率和倾角范围分别为 50% ~ 70% 和 60° ~ 90°。

表 3 优化结果

$V_h / L \cdot h^{-1}$	5	10	15	20	25	30
最佳 $\psi / \%$	58.1	58.9	59.8	60.6	61.4	62.3
最佳 $\phi / (^\circ)$	67.1	69.4	71.8	74.1	76.5	78.9
$Q_{max} / W$	125.0	143.0	161.3	179.9	198.7	217.9

### 5 结论

中心复合设计、方差分析成功地应用于振荡热管传热性能的因素影响分析, 结论如下:

(1) 建立的二阶方程模型很好地模拟了铜-水振荡热管传输功率与影响因素(倾角、充液率和加热水流量)间的关系;

(2) 倾角的影响最为显著, 其次是加热水流量和充液率, 但它们间的交互影响不显著;

(3) 给出了加热水流量在 5 ~ 30 L/h 范围内的最佳充液率、倾角以及相应的最大传输功率, 最佳充液率和倾角随加热水流量的增加有所增加。

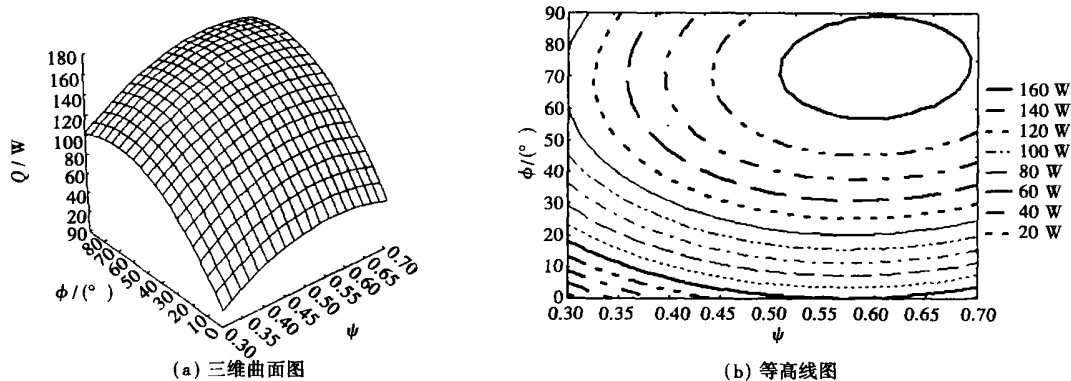


图 4  $V_h=16.5 \text{ L/h}$  时, 传输功率随  $\psi$  和  $\phi$  的变化

参考文献:

[1] 马永锡, 张红, 庄骏. 振荡热管——一种新型独特的传热元件[J]. 化工进展 2004, 23(9): 1008—1013.

[2] RITTIDECH S, TERDTON P, TANTAKOM P, et al. Effect of inclination angles, evaporator section lengths and working fluid properties on heat transfer characteristics of a closed-end oscillating heat pipe[A]. Tantakom P, Vorayos N, Terdtoon P. Proc of 6th International Heat Pipe Symposium[C]. Chiang Mai; Chiang Mai University of Thailand 2000. 413—421.

[3] CHAROENSAWAN P, TERDTON P, TANTAKOM P, et al. Effects of inclination angles, filling ratios and total lengths on heat transfer charac-

teristics of a closed-loop oscillating heat pipe[A]. Tantakom P, Vorayos N, Terdtoon P. Proc of 6th International Heat Pipe Symposium[C]. Chiang Mai; Chiang Mai University of Thailand, 2000. 422—430.

[4] CHAROENSAWAN P, KHANDEKAR S, GROLL M, et al. Closed loop pulsating heat pipes—part A: Parametric experimental investigations [J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23: 2009—2020.

[5] MONTGOMERY D C. Design & analysis of experiments[M]. 3rd Edition. New York; Wiley, 1991.

[6] BOX G E P, DRAPER N R. Empirical model building and response surfaces [M]. New York; Wiley, 1987.

新 机 型

MT30 型船用燃气轮机性能分析

MT30 燃气轮机采用了最新的航空 Trent 发动机材料和工艺。主要性能如下:

- (1) 在 0.98/1.47 kPa 的进、排气损失情况下, 进气温度 26℃ 时的输出功率为 36 MW;
- (2) 燃料消耗率为 207 g/(kWh), 热效率高于 4%;
- (3) 功率重量比为目前市场上最佳;
- (4) 模块化设计简化了维护保养工作;
- (5) 视情维护;
- (6) 可靠性高, 低成本;
- (7) 无任何停车后再启动的限制。

MT30 燃气轮机的优点:

- (1) 先进的设计——MT30 燃气轮机继承了航空 Trent 发动机的诸多先进技术。例如在压气机系统中, 动叶片和静叶片的设计使用了三元方法, 从而达到较高的效率。燃气发生器是双转子构造型式, 低压压气机(IPC) 的 8 级静叶片均为变几何式叶片, 具有 6 级高压压气机(HPC)。动力涡轮由 Trent800 的低压风扇涡轮发展而来, 支持在新设计的坚固的轴承壳体内, 保证相当的可靠性。使用的各个零件均得到过验证, 包括叶片冷却技术、部件使用的保护涂层。
- (2) 箱装体构成——燃气轮机采用箱装体结构, 具有隔声降噪功能, 发动机的所有附件均置于箱装体内。
- (3) 重量轻——MT30 燃气轮机的可更换组件包括动力涡轮重量仅为 6 200 kg(干重), 整个箱装体重量为 22 t。
- (4) 维护量小——MT30 燃气轮机的可用性相当高, 而且都设计在无人机舱内应用; 视情维护是其一个设计特点, 日常维护保养工作仅限于查看各个液面高度以及目视检查。当维护工作必须进行时, 模块化的设计使大修工作加快, 而且使用节省小修时间, 并降低维修成本和减少备件储存数量。

(孙聿峰、王明为 供稿)

utilized to set up a unitary-module refined model of high versatility. Second, with the help of a general correction formula featuring the impact of key factors on component performance a refined revision was conducted for a model of unitary modules. Finally, by using the general means of network connection among modules the logic relationship of system connection is described with a pipe duct equation being used to effect a refined quantification of correlation relationship of variables among modules. A huge amount of engineering cases has demonstrated the validity and feasibility of the measures adopted for the enhancement of the versatility and precision. **Key words:** steam system, modeling, versatility, precision

**振荡热管传热性能的试验设计与多因素分析 = Experimental Design and Multifactor Analysis of the Heat Transfer Performance of an Oscillating Heat Pipe** [刊, 汉] / MA Yong-xi, ZHANG Hong (College of Mechanical and Power Engineering under the Nanjing Polytechnic University, Nanjing, China, Post Code: 210009) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(6). — 571 ~ 574

A multitude of factors can affect the heat transfer in an oscillating heat pipe. The relationship between the heat-pipe heat transfer performance and the various factors is complicated and assumes a nonlinear character. By applying statistical techniques analyzed was the relationship between the heat-transfer performance of the oscillating heat pipe of a copper-water closed loop on the one hand and liquid filling rate, inclination angle and heat input on the other. First, tests were arranged by employing a central composite design method. Then, a fitting of the relationship between test variables and a response was achieved by using a least square method. Finally, through a variance analysis studied were three factors and the degree of their interacting influence. The results of the study indicate that the model of a second order equation can remarkably well reflect the relation between the heat transfer rate and the influencing factors. The three factors have a significant impact on the heat transfer rate with the inclination angle showing the most conspicuous impact. However, their interacting influence is not significant. Within the range of the study the optimum liquid-filling rate and the optimum inclination angle will be somewhat greater when the heating water flow rate undergoes an increase. **Key words:** oscillating heat pipe, central composite design, variance analysis

**旋转圆筒表面对流质交换边界层实验研究 = Experimental Study of the Convective Mass-exchange Boundary Layer of a Rotating Cylindrical Surface** [刊, 汉] / MA Hong-ting, ZHANG Yu-feng (Institute of Environmental Science and Engineering under the Tianjin University, Tianjin, China., Post Code: 300072), LUO Wan-jun (China National Air-to-air Missile Research Institute, Luoyang, China, Post Code: 471000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(6). — 575 ~ 578

Under the status of a stable convective mass-exchange the temperature field and concentration field of the porous-medium surface boundary layer of a horizontal rotating cylinder were measured by using a dry-wet bulb thermometer of micro thermocouple type. The results of the measurements indicate that the thickness of the boundary layer of the convective mass exchange will decrease with an increase in  $Re$ , and the thickness of the concentration boundary layer is greater than that of the temperature boundary layer. The temperature gradient of the heating mass-exchange boundary layer is smaller than that of the pure convective heat-exchange boundary layer. Rotation can produce a different impact on the convective mass-exchange at the consequent side and the inverse side. At the consequent side, due to the coincidence of the action direction of both the rotation-enforced convection and the natural convection, the result of this overlap has led to an increase in