

Dynamic Model Identification of Liquid Cooling Equipments for Power Electronics Devices

Haifa LIU, Xianming LI, Li BAI

School of Control Science and Engineering, Shandong University, 250061, Jinan, China

Email: mingli@sdu.edu.cn

Abstract: The experimental system of liquid cooling equipment for power electronic devices has been built. By the least squares method, we have built the dynamic models of liquid cooling equipments from one step model to four step model. The error of one step models is smaller than that of other models, and the precision is satisfactory for requirement. The experimental system and modeling method can also be used to the study of the liquid cooling substrates of integrated power electronic modules based on micro-channel.

Keywords: heat sink; least squares method; system identification; dynamic mathematical model

电力电子设备液冷装置的动态模型辨识

刘海法, 李现明, 白丽

山东大学控制科学与工程学院, 山东济南, 中国, 250061

Email: mingli@sdu.edu.cn

摘 要: 构建了电力电子设备液冷装置的测试平台, 采用最小二乘辨识方法建立了液冷装置一阶到四阶的动态数学模型, 经计算后发现一阶数学模型的误差值最小、符合精度要求。该测试平台和建模方法也适合于正处于研究阶段的电力电子集成模块微通道液冷基板。

关键词: 液冷基板; 最小二乘法; 系统辨识; 动态数学模型

1 引言

电力电子技术广泛应用于国民经济的各个行业, 在风力发电行业、太阳能光伏发电行业等可再生能源领域也发挥着日益重要的作用^[1]。热控制是电力电子设备的共性关键技术之一^{[2][3]}, 与设备的可靠运行密切相关。液体冷却技术是一种重要的电力电子设备热控制技术, 加强对它的研究具有重要意义。

目前, 国内外有关电力电子液体冷却技术的研究大多集中在对散热器的结构^{[4][5][6]}、静态特性^{[7][8]}的研究, 很少涉及对其动态特性的研究。事实上, 电力电子设备热控制装置的动态特性与电力电子设备的可靠性运行直接相关。如何获取电力电子设备液冷装置的动态数学模型正是本文旨在解决的问题。

2 电力电子设备液冷装置测试平台

如图 1 所示。

液冷基板散热器测试平台包括模拟电力电子模块

本文得到国家自然科学基金 (50877046) 支持。

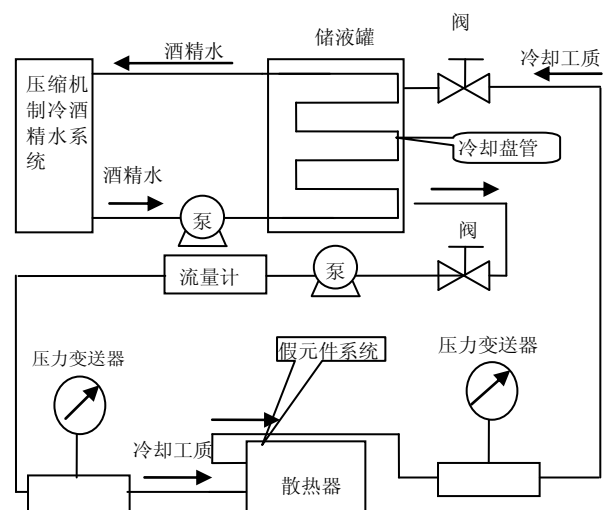


Figure 1. The Block diagram of the test system of heat sink

图 1. 液冷基板散热器测试系统框图

发热的假元件及其电气控制系统, 冷却工质温度、流量、压力测量与控制系统, 数据采集和数据处理系统。为保证冷却工质温度的可控性、稳定性, 对其采用了

二次制冷的技术方案, 亦即先由压缩机将酒精水制冷, 再由酒精水对冷却工质制冷。循环管路中的冷却工质为水。假元件产生的热量以热传导的方式传递给液冷装置, 微型水泵驱动冷却水在液冷装置中循环, 通过对流换热作用不断将热量带入冷却工质储液罐。测试平台上配置了各种温度、压力、流量、电流、电压传感器, 由计算机实现自动测量与控制。

3 电力电子设备动态模型辨识研究

在系统辨识建模中, 输入量为加热功率(P), 输出量取液冷装置的表面温度(T)。模型建立的原则是通过一部分训练样本在某一特定的流量下建立模型后, 再用一部分没有参与系统辨识建模的校验样本实验数据验证这一辨识模型的正确性。

3.1 辨识用实验数据获取

在不同流量下, 通过数据采集系统, 采集实验数据进行液冷装置的动态模型辨识。取热电偶 1(T₁)和热电偶 2(T₂)二者的平均值为液冷装置的表面温度, 以 8.45L/min 时的数据采集表为例, 如表 1 所示。因数据较多, 此处仅给出 5 组数据作为示例。以采集数据中的前 16 组数据作为训练样本, 建立动态模型, 利用后面的 21 组数据作为校验样本, 对建立的液冷基板散热器的动态模型进行校验, 验证模型的可靠性和准确性。

Table 1. Under 8.45L/min, the data of surface temperature and the heating power

表 1. 水泵在 8.45L/min 下, 散热器表面温度与加热功率的数据

序号	P	T ₁	T ₂	T
1	22.5	8.7	7.9	8.3
2	33.6	8.7	8.0	8.35
3	36.6	8.7	8.1	8.4
4	54.4	8.9	8.2	8.55
5	63	9.0	8.3	8.65

3.2 最小二乘模型辨识

考虑如下模型^{[9][10][11]}

$$z(k) = h^T(k)\theta + e(k) \quad (1)$$

的辨识问题, 上式中, $z(k)$ 和 $h(k)$ 都是可观测的数据, θ 是待估计的参数, 取准则函数

$$J(\theta) = \sum_{k=1}^L [e(k)]^2 = (z_L - H_L \theta)^T (z_L - H_L \theta) \quad (2)$$

极小化 $J(\theta)$, 求得参数 θ 的估计值, 将使模型的输

出最好地预报系统的输出。

设 $\hat{\theta}_{LS}$ 使得 $J(\theta)|_{\hat{\theta}_{LS}} = \min$, 则有

$$\frac{\partial J(\theta)}{\partial \theta} \bigg|_{\hat{\theta}_{LS}} = \frac{\partial}{\partial \theta} (z_L - H_L \theta)^T (z_L - H_L \theta) = 0 \quad (3)$$

展开上式, 并运用如下两个向量微分公式

$$\frac{\partial}{\partial x} (\alpha^T x) = \alpha^T, \quad \frac{\partial}{\partial x} (\alpha^T A x) = 2x^T A \quad (4)$$

A 为对称阵得正则方程

$$(H_L^T H_L) \hat{\theta}_{LS} = H_L^T z_L \quad (5)$$

当 $H_L^T H_L$ 是正则矩阵时, 有

$$\hat{\theta}_{LS} = (H_L^T H_L)^{-1} H_L^T z_L \quad (6)$$

$$\text{且: } \frac{\partial^2 J(\theta)}{\partial \theta^2} \bigg|_{\hat{\theta}_{LS}} = 2 H_L^T H_L > 0 \quad (7)$$

所以满足要求的 $\hat{\theta}_{LS}$, 使 $J(\theta)|_{\hat{\theta}_{LS}} = \min$, 并且

是唯一的。对应的 $\hat{\theta}_{LS}$ 即称为最小二乘估计值。

针对本散热系统, 以二阶系统为例进行说明说明如下: 我们选择如下的辨识模型

$$z(k) + a_1 z(k-1) + a_2 z(k-2) = b_1 u(k-1) + b_2 u(k-2) + v(k) \quad (8)$$

输入信号我们选择 $k=1$ 到 $k=15$ 的数据, 输出信号选取 $k=1$ 到 $k=16$ 的数据, 则待辨识的参数

$$\hat{\theta}_{LS} = (H_L^T H_L)^{-1} H_L^T z_L \quad (9)$$

式中, 被辨识参数 $\hat{\theta}_{LS}$ 、观测矩阵 z_L 、 H_L 的表达式为

$$\hat{\theta}_{LS} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}, \quad z_L = \begin{bmatrix} z(3) \\ z(4) \\ \vdots \\ z(16) \end{bmatrix}$$

$$H_L = \begin{bmatrix} -z(2) & -z(1) & u(2) & u(1) \\ -z(3) & -z(2) & u(3) & u(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -z(15) & -z(14) & u(15) & u(14) \end{bmatrix} \quad (10)$$

程序流程图如下图 2 所示。

3.3 模型辨识结果与校验

将系统作为单输入 $h(k)$ 和单输出 $z(k)$ 系统处

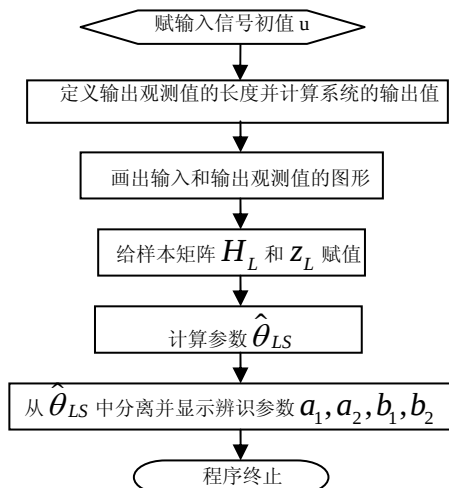


Figure 2. The method of the least squares method
图 2. 最小二乘一次完成算法流程图

理，分为四种模型，系统辨识建立的模型结果如下：

(1)一阶系统辨识结果

$$z(k) - 1.0137z(k-1) = 0.00014u(k-1) + v(k) \quad (11)$$

式中 $v(k)$ 为系统的噪声，下同。

(2)二阶系统辨识结果

$$\begin{aligned} z(k) - 0.3157z(k-1) - 0.7030z(k-2) = \\ 0.0027u(k-1) - 0.0024u(k-2) + v(k) \end{aligned} \quad (12)$$

(3)三阶系统辨识结果

$$\begin{aligned} z(k) - 1z(k-1) + (1.2e-011)z(k-2) - \\ (1.1e-011)z(k-3) = -(3.6e-015)u(k-1) \\ + (6.9e-014)u(k-2) - (4.4e-014)u(k-3) + v(k) \end{aligned} \quad (13)$$

(4)四阶系统辨识结果

$$\begin{aligned} z(k) - (2.9e-012)z(k-1) + 1z(k-2) \\ + (7.6e-012)z(k-3) - (5.3e-012)z(k-4) = \\ -(2.4e-014)u(k-1) + (9.1e-016)u(k-2) \\ + (3.6e-014)u(k-3) - (3.1e-014)u(k-4) + v(k) \end{aligned} \quad (14)$$

上述四个阶次的模型中，哪一个模型是最优的，用没有参加系统辨识的实验数据（即校验样本）对其进行检验，然后求得误差最小的模型即为我们需要建立的动态模型。

计算误差时，误差计算为：

$$\text{误差} = \text{模型计算温度} - \text{测量的表面温度} \quad (15)$$

散热器动态模型所得出的一阶模型计算出的温度值与测量值的误差对照表如表 2 所示；这里只列出第

10 组数据作为示例，辨识模型所得二阶、三阶和四阶模型计算所得出的温度值与测量值的误差按表 2 对一阶误差的处理方式进行，以一阶模型为例进行计算说明。

Table 2. The error of one step
表 2. 一阶模型误差对照表

模型参数			一阶模型			
序号	加热功率 (W)	测量温度 (°C)	计算温度 (°C)	$\varepsilon_1(k)$	相对误差	$\varepsilon_1^2(k)$
17	303.92	10.85	10.78	-0.07	0.60%	0.0043
18	335.65	11.1	11.04	-0.06	0.53%	0.0035
19	355.32	11.35	11.3	-0.05	0.45%	0.0026
20	379.9	11.45	11.56	0.11	0.92%	0.0111
21	412.5	11.75	11.66	-0.09	0.77%	0.0081
22	439.6	11.95	11.97	0.02	0.16%	0.0004
23	456	12.15	12.18	0.03	0.21%	0.0006
24	478.5	12.25	12.38	0.13	1.06%	0.017
25	518.5	12.45	12.48	0.03	0.28%	0.0012
26	542.5	12.7	12.69	-0.01	0.05%	0

利用前面介绍的误差准则函数的计算方法，从表 2 中，计算的一阶模型误差的平方和为：

$$J_1(\theta) = \sum_{k=16}^{37} \varepsilon_1^2(k) = 0.1853 \quad (16)$$

按表 2 的计算方法可得二阶模型误差的平方和为

$$J_2(\theta) = \sum_{k=16}^{37} \varepsilon_2^2(k) = 0.2304 \quad (17)$$

$$\text{三阶为: } J_3(\theta) = \sum_{k=16}^{37} \varepsilon_3^2(k) = 1.8075 \quad (18)$$

$$\text{四阶为: } J_4(\theta) = \sum_{k=16}^{37} \varepsilon_4^2(k) = 6.6675 \quad (19)$$

对比上述四个计算结果，我们得出：

$$J_1(\theta) > J_2(\theta) > J_3(\theta) > J_4(\theta) \quad (20)$$

其中由一阶和二阶模型得到的误差准则函数 $J_1(\theta), J_2(\theta)$ 的数值比较接近，一阶模型的最大相对误差为 1.21%，二阶模型的最大相对误差为 1.59%。

由此我们可见如果在已知部分实验数据对实验进行一步预报时，输入即加热功率变化为 50W 范围以内时，采用一阶和二阶数学模型进行一步数据预报散热器的输出还是比较准确的，完全能够满足我们的实验要求。由实验数据辨识所得出的三阶和四阶的数学模型，将我们所得到的检验数据代入所得到的模型，可以得到由三阶所得到的验证实验数据的最大相对误差为

3.30%，四阶模型所得到的最大相对误差为 5.50%。考虑一阶和二阶模型实验相对误差较小，在保证相对误差较小的要求下，我们暂时选用一阶和二阶模型作为我们需要的辨识模型。

下面考虑递推环节下的数据：如果我们只知道实验过程中的前 16 个实验的输入数据，如何预测后面的数据呢。方法如下：从第 16 步开始计算，我们通过设定输入的步长，即通过设定输入步长在 50W 以内，实验输入数据取做实验时的加热功率，对一阶模型输出数据取第 16 步的输出数据（即散热器表面测量温度）；对二阶模型，输出数据取第 15 和第 16 步的输出数据（即散热器表面测量温度），应用差分方程，采用递推的方法，得一阶的递推实验结果如表 3 所示，此处列出 10 组数据作为示例。

Table 3. The error data concluded from the recursive method

表 3. 由递推的方法得到的误差数据表

模型参数			一阶模型			
序号	加热功率(W)	测量温度(℃)	计算温度(℃)	误差e(k)	相对误差	误差平方
17	303.92	10.85	10.78	-0.07	0.60%	0.0043
18	335.65	11.1	11.04	-0.06	0.53%	0.0035
19	355.32	11.35	11.35	0.00	0.00%	0.0000
20	379.9	11.45	11.56	0.11	0.92%	0.0111
21	412.5	11.75	11.77	0.02	0.14%	0.0003
22	439.6	11.95	11.99	0.04	0.30%	0.0013
23	456	12.15	12.21	0.06	0.51%	0.0038
24	478.5	12.25	12.44	0.19	1.57%	0.0371
25	518.5	12.45	12.68	0.23	1.85%	0.0529
26	542.5	12.7	12.93	0.23	1.78%	0.0512

从表 3 中，我们得出一阶模型的递推所得出的误差准则函数即检验样本值的误差平方和为 0.3032，最大相对误差为 1.85%；由二阶模型递推所得出的误差准则函数检验样本值的误差平方和为 2.2873，最大相对误差为 3.78%。对比这两个模型，考虑检验精度及实际应用和计算方便，我们选用一阶模型进行辨识。

采用上述平台和建模方法，还对另外几种电力电子设备液冷装置进行了静、动态特性测试与研究。实验证明，能够较准确的预报出动态条件下液冷装置的表面温度。

4 结论

设计了电力电子设备液冷装置的性能测试方法，采用最小二乘辨识方法建立了液冷装置表面温度与加热功率之间的动态数学模型。该测试平台和建模方法也可用于电力电子集成模块微通道液冷基板的测试与分析。

致 谢

本文得到国家自然科学基金(50877046)的支持。

References (参考文献)

- [1] Bimal K.Bose. Modern power electronics and AC drives. Beijing: China Machine PRESS. 2005:3-7.
Bimal K.Bose 著，王聪，赵金，于庆广，程红 译. 现代电力电子学与交流传动[M]. 北京：机械工业出版社，2005：3-7.
- [2] Zhang Xiaojing, Yi Zhihua. New Achievements of Power and Electronic Device Cooling Technology[J], *New Technology & New Process*, 2008, 1:43-45
张小京，易志华. 电力电子设备的冷却技术研究进展[J]. 新技术新工艺. 2008, 1: 43-45
- [3] Dustin A. Murdock, Jose E. Ramos Torres, Jeffrey J. Connors, and Robert D. Lorenz. Active Thermal Control of Power Electronic Modules. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 42, NO. 2, MARCH/APRIL 2006
- [4] Tuckerman D B, Pease R F W. High performance heat sink for VLSI. IEEE Electron Device Letters, 1981, 2(5):126-129.
- [5] Kandlikar S G, Grande W J. Evolution of micro channel flow passages-Thermo hydraulic performance and fabrication technology. Heat Transfer Engineering, 2003, 24(1):3-17.
- [6] Garimella S V, Sobhan C B. Transport in micro channels-A critical review. Annual Review Heat Transfer, 2003, 15:527-530.
- [7] Cao Yusheng, Liu Jun, Shi Fazhong. The Study of Thermal Analysis of Multi-Chip Module by Thermal Resistor Network[J], *Journal of Astronautics*, 2006, 27(3)
曹玉生,刘军,施法中.利用热阻网络拓扑关系对多芯片组件热分析技术的研究[J].宇航学报.2006,27(3)
- [8] Lan Yuanliang, Tang Guangfu, Yin Yonghua, Zhou Xiaoxin, Xin Yumei, Study on Analysis Methods of Thyristor Thermal Model[J], *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(19): 1-6
蓝元良, 汤广福, 印永华, 周孝信, 辛玉梅. 晶闸管热阻抗分析方法的研究 [J]. 中国电机工程学报. 2007, 27(19): 1-6.
- [9] Wang Xiufeng, Lu Guizhang. Modeling and Identification of System [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004: 231-240.
王秀峰, 卢桂章. 系统建模与辨识 [M]. 北京：电子工业出版社，2004：231-240.
- [10] Hou Yuanbin, Wang Mei, Wang Liqi. System Identification and MATLAB Simulation [M]. Beijing: Science Press 2004 3-20.
侯媛彬, 汪梅, 王立琦. 系统辨识及其 MATLAB 仿真 [M]. 北京：科学出版社. 2004 3-20.
- [11] Pang Zhonghua, Cui Hong. System Identification and Adaptive Control MATLAB Simulation [M]. Beijing: Beihang University Press, 2009: 11-35.
庞中华, 崔红. 系统辨识与自适应控制 MATLAB 仿真 [M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2009：11-35.