

离心式冷水机组经验回归模型的分析与评价

田柏秋¹, 潘毅群¹, 黄治钟²

(1.同济大学机械与能源工程学院,上海 201804 2.同济大学中德工程学院,上海 201804)

摘要: 介绍了5种常用离心式冷水机组经验回归模型:一次线性模型(SL)、二次线性回归模型(BQ)、多元多项式回归模型(MP)、Gordon-Ng模型、二次齐次多项式回归模型(QHP)。利用①定频、定流量,②变频、定流量,③变频、冷冻侧变流量、冷却侧不变流量,④变频、冷冻侧、冷却侧变流量4种类型的离心式冷水机组共4523组数据进行线性回归分析,结果发现QHP模型对于4种不同类型的机组模拟效果在5种模型中均最好,均在94%以上,MP模型采用更少的自变量,拟合效果趋近于QHP模型,与QHP模型相差在±2%之间。

关键词: 离心式冷水机组; 经验模型; 最小二乘法; 回归模型

中图分类号: TU831.3*1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-7237(2014)02-0015-06

Analysis and Evaluation of Empirically Based Steady-State Models for Centrifugal Chillers

TIAN Bai-qiu¹, PAN Yi-qun¹, HUANG Zhi-zhong²

(1.School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2.Sino-German College of Applied Sciences, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: This paper first presents five empirically based models for steady-state modeling of centrifugal chillers, i.e. Simple linear regression model (SL), Bi-quadratic regression model (BQ), Multivariate polynomial regression model (MP), Gordon-Ng model and Quadratic homogeneous polynomial regression model (QHP). They are applied to predict the coefficient of performance using 4523 chiller data sets from chiller manufacturers. The data sets comprise four broad classifications, including (1) constant speed, constant condenser and chilled water flow, (2) variable speed, constant condenser and chilled water flow, and (3) variable speed, constant condenser and variable chilled water flow, and (4) variable speed, variable condenser and chilled water flow. The regression parameters for each performance model are obtained using least squares method. The comparison demonstrates that QHP model shows the best prediction accuracy for all kinds of data sets (>94%) and MP model has less regression parameters while shows less prediction accuracy than QHP model (±2%).

Keywords: centrifugal chillers; empirically based models; least square method; regression

0 引言

随着国民经济高速发展,我国已经成为世界第二能耗大国。制冷空调产品更是消耗了约20%的电能。冷水机组作为最主要的空调产品,其能耗占空调系统总能耗的60%~70%,其效率的提高对实现节能降耗尤为重要,因此,它们的节能特性更应引起足够的关注。

离心式冷水机组具有单机冷量大、体积小、运行可靠、故障率低、性能系数高、可实现无极调节等特点,应用范围相当广泛。由于冷水机组结构复杂、

收稿日期 2013-10-15; 修回日期 2013-12-27

体积庞大、生产周期长、制造成本高,在开发过程中难以做多次的实验测试分析与研究。为了节省设备研发和调试成本,目前常采用的方法是建立离心式冷水机组模型。能够代表冷水机组实际运行性能的数学模型不仅是实现冷水机组优化设计、优化控制的重要工具,同时也常用在冷机性能预测、系统优化、故障诊断等方面。

这些问题都关系特定运行工况下机组的性能,机组性能常用COP表示,即机组制冷量与功耗的比值。在实际中机组载冷剂侧的工况数据远比制冷剂侧的数据容易测量,载冷剂侧的常用工况数据为冷凝器进

出水温、蒸发器进出水温、蒸发器水流量、冷凝器水流量和制冷量,如图1所示。

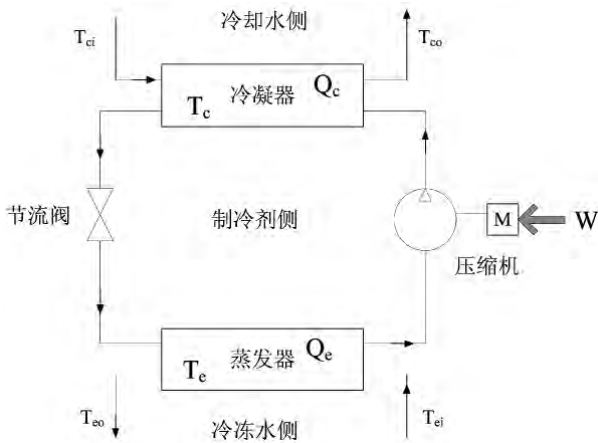


图1 冷水机组运行状态参数

Fig.1 Schematic of a centrifugal water chiller

冷水机组的经验模型可分为黑箱(经验)模型和灰箱(半经验)模型^[1]。灰箱模型需要建立表达冷水机组的物理模型,然后用统计分析的方法确定各项物理参数。黑箱模型建立实测机组 COP 与各项影响因子之间的回归模型,黑箱模型可以是单纯的统计模型,也可以基于一些基本物理意义,黑箱模型基于历史数据,参数辨识更加简单,但当黑箱模型超出样本数据范围时,模型的可靠性较差。比较经典的灰箱模型有 Gordon-NG 模型^[2]和 Lee 简化^[3-4]模型,黑箱模型有 DOE-2、MP、BQ、SI、SMP 模型^[3-7]等。无论是黑箱模型还是灰箱模型,基于有限历史数据前提下,模型的准确性、鲁棒性、适用性是评价模型的主要标准。

20 世纪 80 年代^[5],DOE-2 模拟软件中的冷水机组模型用 3 条曲线、15 个回归系数建立的回归模型表示。3 条曲线由设计条件的特性外推到制冷机非设计条件、部分负荷时的变工况性能。但 3 条曲线均不包含流量对机组的影响。

20 世纪 90 年代^[8-9]ASHRAE primary systems toolkit 提出一种物理模型。模型基于热力学第一定律和传热方程建立各元件(包括压缩机、经济器、膨胀阀、壳管式冷凝器以及满液式蒸发器等)的变工况模型,整个系统的变工况性能需要反复迭代求解。

20 世纪 90 年代^[2]J.M. Gordon 和 K.C. Ng 提出了一种经典的灰箱模型,该模型利用热力学第一定律和第二定律分析得到冷水机组性能系数 COP 的近似通用理论解,此模型由此得名为 Gordon-NG 模型。

本文首先对一次线性模型、二次线性回归模型、多元多项式回归模型、Gordon-NG 模型、二次齐次多项式回归模型共 5 个经验模型进行分析,然后利用厂家①定频、定流量,②变频、定流量,③变频、冷冻侧变流量、冷却侧不变流量,④变频、冷冻侧、冷却侧变流量 4 种类型的离心式冷水机组共 4 523 组数据进行

最小二乘拟合,对模型的准确性、适用性及鲁棒性进行评价。

1 离心式冷水机组模型

模型的性能主要从以下方面评价:

- (1)模型准确性;
- (2)模型参数辨识所需要的样本要求;
- (3)模型参数辨识的难度;
- (4)模型的适用性;
- (5)模型参数代表的物理意义。

本文主要对①一次线性模型(Simple linear regression model);②二次线性回归模型(Bi-quadratic regression model);③多元多项式回归模型(Multivariate polynomial regression model);④ Gordon-NG 模型;⑤二次齐次多项式回归模型(Quadratic homogeneous polynomial regression model),这 5 个模型进行建立及评价。

1.1 一次线性模型(SL model)

一次线性模型属于黑箱模型,是机组在设计选型阶段使用的简单模型,模型是机组 COP 关于制冷量 Q_e 、蒸发器进水温度 T_e 和冷凝器进水温度 T_c 的关联,如式(1)所示。

$$\text{COP}=\beta_1 Q_e+\beta_2 T_e+\beta_3 T_c \quad (1)$$

1.2 二次线性模型(BQ model)

二次线性模型只有两个自变量,此模型只考虑制冷量 Q_e 和冷凝器进水温度 T_c 的影响,最先用于计算机组压缩机功耗,对离心式、压缩式、往复式机组均适用,后来此模型也被开发应用于机组运行性能的预测,模型结构如式(2)所示。

$$\frac{1}{\text{COP}}=\beta_0+\beta_1 \frac{1}{Q_e}+\beta_2 Q_e+\beta_3 \frac{T_c}{Q_e}+\beta_4 T_c+\beta_5 \frac{T_c^2}{Q_e}+\beta_6 Q_e T_c+\beta_7 T_c^2+\beta_8 Q_e T_c^2 \quad (2)$$

1.3 多元多项式回归模型(MP model)

多元多项式回归模型属于黑箱模型,模型将制冷量 Q_e 、冷凝器进水温度 T_c 和蒸发器进水温度 T_e 这 3 个物理量考虑进去,以 3 个物理量的一次项、二次项及两两相乘项作为自变量,多元多项式回归模型曾经用在 DOE 中,模型结构如式(3)所示。

$$\text{COP}=\beta_0+\beta_1 Q_e+\beta_2 T_e+\beta_3 T_c+\beta_4 Q_e^2+\beta_5 T_e^2+\beta_6 T_c^2+\beta_7 Q_e T_e+\beta_8 T_e T_c+\beta_9 Q_e T_c \quad (3)$$

1.4 Gordon-NG 模型

Gordon-NG 模型基于热力学第一定律和第二定律提出,并对某些传热过程进行简化,根据简化的程度和采用物理量的不同,Gordon-NG 模型有多种不同的形式,这里介绍最常用的一种模型,该模型同多元多项式模型一样,也是将 COP 与制冷量 Q_e 、冷凝器进水温度 T_c 和蒸发器进水温度 T_e 联系起来,模型结构如式(4)所示。

$$\frac{T_e}{T_c} \left(\frac{1}{COP} + 1 \right) - 1 = \beta_1 \frac{T_e}{Q_e} + \beta_2 \frac{T_c - T_e}{T_c Q_e} + \beta_3 \frac{Q_e}{T_c} \left(\frac{1}{COP} + 1 \right) \quad (4)$$

1.5 二次齐次多项式回归模型(QHP model)

二次齐次多项式回归模型是综合考虑离心式冷水机组实际运行中与机组 COP 相关、且方便测量的物理量,对于冷冻侧、冷却侧均变流量的冷机,温差也是变化的,所以将制冷量 Q、冷凝器进出水温度 T_c 和 $T_{c\infty}$ 、蒸发器进出水温度 T_e 和 $T_{e\infty}$ 一共 5 个物理量的 1 次项、2 次项及两两相乘项共 20 个自变量与 COP 进行线性回归,完全从统计学的角度建立模型,此模型由于采用较多的自变量,为防止过拟合的发生,应采用一定数量的样本数据,如式(5)所示。

$$COP = \beta_0 + \beta_1 Q + \beta_2 T_e + \beta_3 T_{e\infty} + \beta_4 T_c + \beta_5 T_{c\infty} + \beta_6 Q^2 + \beta_7 T_e^2 + \beta_8 T_{e\infty}^2 + \beta_9 T_c^2 + \beta_{10} T_{c\infty}^2 + \beta_{11} Q T_e + \beta_{12} Q T_{e\infty} + \beta_{13} Q T_c + \beta_{14} Q T_{c\infty} + \beta_{15} T_e T_c + \beta_{16} T_e T_{e\infty} + \beta_{17} T_e T_c + \beta_{18} T_e T_{c\infty} +$$

$$\beta_{19} T_e T_{e\infty} + \beta_{20} T_c T_{c\infty} \quad (5)$$

2 样本数据描述

为验证各个模型的适用性,本文采用 4 种不同类型的冷机数据分别对上述 5 个模型进行验证,4 种不同类型的冷机数据分别为①定频、定流量,②变频、定流量,③变频、冷冻侧变流量、冷却侧不变流量,④变频、冷冻侧、冷却侧变流量,各机组样本数据量如表 1。数据均来源于厂家样本,各机组详细运行参数,包括制冷量、输入功率、额定冷冻水进出水温、额定冷却水进出水温、额定冷冻水流量、额定冷却水流量、额定 COP、NPLV,见表 2。表 3 给出了各机组样本数据中各物理量的范围,比如,机组 A 为不变频不变流量,样本数据量涵盖了负荷率从 15%~100%的范围,冷冻水出水温度范围为 6.67~11.7℃,冷冻水供回水温差范围在 0.76~5.54℃,冷却水进水温度在 18.33~36℃范围内,冷却水进出水温差范围在 0.76~5.13℃范围内,所以样本数据几乎包含了实际运行中可能出

表 1 样本数据描述

Table 1 Details of chiller data sets

Chiller	额定制冷量/kW	制冷剂	机组是否变频	冷冻水侧变流量	冷却水侧变流量	样本数量
A	2 110	134A	否	否	否	608
B	1 582	134A	是	否	否	838
C	2 813.5	134A	是	是	否	280
D	1 582	134A	是	是	是	2 797

表 2 各冷机额定工况数据

Table 2 The rated data of all chillers

Chiller	额定制冷量/kW	输入功率/kW	冷冻水进出水温/℃	冷却水进出水温/℃	冷冻水流量/(L/s)	冷却水流量/(L/s)	额定 COP	NPLV
A	2 110	330	6.67/12.2	29.44/34.6	90.9	113.6	6.394	7.616
B/D	1 582	273	6/11.9	30/36.27	64	70	5.794	9.471
C	2 813.5	567	6.67/15.5	29.44/37.9	75.7	94.6	4.96	8.43

表 3 样本数据各物理量范围

Table 3 Variation range of the chiller parameters

Chiller	冷冻水出水温/℃	冷冻水进出水温差/℃	冷却水进水温/℃	冷却水进出水温差/℃	负荷率/%	COP
A	6.67~11.7	0.76~5.54	18.33~36	0.76~5.13	15~100	3.67~8.54
B	6~12.5	0.79~5.9	18.3~36.2	0.6~6.9	13~100	3.21~17.58
C	6.7~12.5	4.7~9	18.3~34	1.2~8.6	10~100	3.33~9.64
D	5.82~12.5	0.86~6	18.3~37	0.4~8.83	13~100	3.2~17.2

现的情况,如图2给出了机组A部分样本数据冷冻水进出水温、冷却水进出水温的分布图。

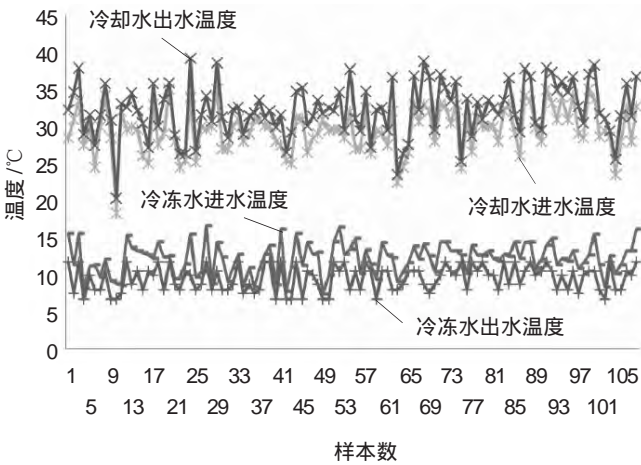


图2 Chiller A 部分样本工况数据分布图

Fig.2 The plot of chilled water inlet/outlet temperature vs. cooling water inlet/outlet temperature for chiller A

3 最小二乘线性回归

线性回归模型一般形式为:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_m X_m + e \quad (6)$$

式中 Y 表示数据中因变量 Y 可以近似地表示为解释变量(自变量) X_1, X_2, X_3 的线性函数;

β_0 为常数项;

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 等为回归系数 (regression coefficient), 表示在其他自变量保持不变时 X_m 增加或减少一个单位时 Y 的平均变化量;

e 为去除 m 个自变量对 Y 影响后的随机误差(残差)。

最小二乘法(OLS)是线性回归中最常用的方法,当模型满足:①线性假设,即模型为 $Y = a + bX + u$;②随机误差 $e \sim N(0, \sigma^2)$;③独立性假设,即 $Cov(u_1, u_2) = 0$, 误差间不相关;④扰动项与解释变量间无关,即 $Cov(u, X) = 0$ 这4个假设时,最小二乘法(OLS)也是最准确的方法。最小二乘法求解在残差为最小的条件下解算测量估值或参数估值,最小二乘法的矩阵求解为以下公式。

$$X'X\beta = X'Y \quad \text{或者} \quad \beta_{OLS} = (X'X)^{-1} X'Y \quad (7)$$

式中 β_{OLS} 为最小二乘估计值;

X 为 $n \times m$ 自变量矩阵,其中 m 为自变量种类, n 为样本数;

Y 为 $n \times 1$ 因变量矩阵。

模型的评价直接关系到选择何种模型,模型的评价标准有很多种,在其中选择何种评价标准及指标是模型评价的重点问题。

3.1 拟合优度检验

回归方程的拟合优度检验是检验样本的数据点聚集在回归线周围的密集程度,从而评价回归方程对样本数据的代表程度。 R^2 反映了回归方程所能解释的

变差的比例,计算如式(8)所示。

$$R^2 = \frac{ESS}{TSS} = 1 - \frac{RSS}{TSS}, \quad ESS = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2,$$

$$RSS = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad TSS = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (8)$$

式中 ESS 为回归平方;

RSS 为残差平方和;

TSS 为总变差平方和;

$$TSS = ESS + RSS$$

$y_i, \hat{y}_i, \bar{y}_i$ 分别为因变量的实际值、模拟值、实际平均值。

在应用过程中发现,对于同种样本数据,当加入的自变量越多, R^2 越大,所以需调整 R^2 以剔除变量个数对拟合优度的影响,调整的 R^2 计算如式(9)所示。

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{RSS/(n-m-1)}{TSS/(n-1)} \quad (9)$$

式中 n 为样本数的个数;

m 为自变量的个数。

3.2 显著性 F 检验

显著性检验是检验被解释变量与所有解释变量之间的线性关系是否显著, F 检验是平均多元线性回归效果的重要标准。 F 检验提出如下原假设与备择假设:

$$H_0: \beta_0 = \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_m = 0$$

$$H_1: \beta_j \text{ 不全为 } 0$$

在原假设 H_0 成立的条件下,统计量

$$F = \frac{ESS/m}{RSS/(n-m-1)} \quad (10)$$

服从自由度为 $(k, n-m-1)$ 的 F 分布,对于给定显著性水平 α ,可得到临界值 $F_\alpha(k, n-k-1)$,由样本求出统计量 F 的数值,通过 $F > F_\alpha(k, n-k-1)$ 或 $F \leq F_\alpha(k, n-k-1)$,来拒绝或接受原假设 H_0 ,以判定原方程总体上的线性关系是否显著成立。

对于同一模型,当这个比值越大时, X 的联合对 Y 的解释程度高,模型总体线性关系越好。

此外, F 与 R^2 可以互推,它们的关系为:

$$F = \frac{R^2}{1-R^2} \frac{n-m-1}{m} \quad (11)$$

4 模型验证

利用4种不同类型的冷机数据,对上述5种模型共进行20次最小二乘回归,各个模型的回归效果用 R^2, \bar{R}^2 表示,各个模型的回归结果如表4所示,在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 的基础上,以下各模型均通过 F 检验,给出 F 值作为参考。图3给出了各个模型在不同冷机样本数据下的 \bar{R}^2 值,来进行不同模型的准确性和适用性分析。

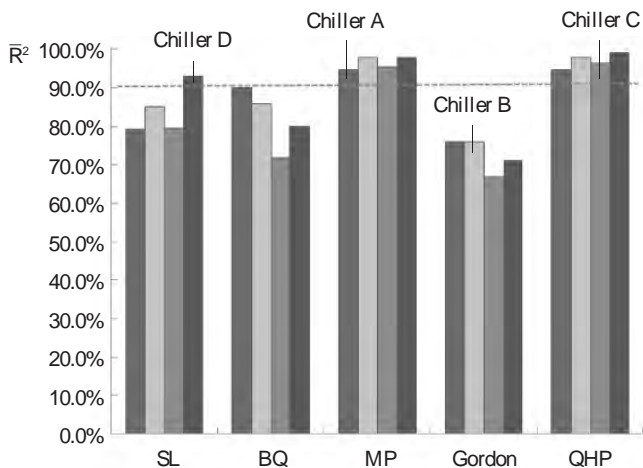
由表4可看出,在不同种类机组样本数据中, QHP 模型和 MP 模型的拟合效果均较理想,4种类型的机

表4 各模型回归结果

Table 4 Statistical results of five models for all chiller cases

Chiller		SL	BQ	MP	Gordon	QHP
A	R^2	79.5%	90.1%	94.8%	76.4%	94.9%
	\bar{R}^2	79.4%	90.0%	94.7%	76.3%	94.8%
	F 值	782	906.8	1 211	2.6	1 000
B	R^2	85.3%	86.1%	98.0%	76.4%	98.1%
	\bar{R}^2	85.2%	86.0%	98.0%	76.3%	98.0%
	F 值	1 609	734.4	4458	900.7	3 788
C	R^2	79.7%	72.5%	95.6%	67.4%	96.7%
	\bar{R}^2	79.5%	71.9%	95.4%	67.0%	96.5%
	F 值	361	120	645	190	556
D	R^2	93.1%	80.0%	97.9%	71.2%	99.1%
	\bar{R}^2	93.1%	80.0%	97.9%	71.1%	99.1%
	F 值	12 540	1 863	14 760	2 298	19 990

组拟合优度均大于 90%。其中, QHP 的模拟效果最好, 特别是对于变频、冷冻侧、冷却侧变流量的冷水机组 D, \bar{R}^2 达到 99.1%, 分析其原因是模型 D 采用的自变量最多, 考虑的物理量更多, 即模型包含机组性能的影响因子更多, 所以, 拟合的效果最好。其次是 MP 模型, MP 模型类似 QHP 模型, 但相对于 QHP 模型, 采用更少的自变量, 但模拟效果接近 QHP 模型。A 类机组样本数据的 \bar{R}^2 均在 0.94 以上, SL 模型由于只考虑了 3 个物理量的一次项, 模拟效果相对于 MP 模型和 QHP 模型较差, BQ 模型也只考虑两个物理量, 模拟效果接近 MP 模型, 相对于 MP 模型和 QHP 模型较差, Gordon-NG 模型基于严格的物理意义, 但在与其他的模型比较时, 模拟效果较差, 准确性并不高。

图3 各模型 \bar{R}^2 统计Fig.3 A comparison of the \bar{R}^2 of five models for all chiller cases

针对机组 A, 将 5 组模型的预测值与模拟值对比, 如图 4 所示, 图中以 m 为下标的表示实际值, 以 p 为下标的表示模拟值, 由图也可以发现 MP 模型与 QHP 模型预测模型效果理想, 且两者的预测结果分布极其相似, 这也与两者模型结构相似的条件吻合。

对于某种模型的适用性分析, 可通过对比分析同种模型不同机组的模拟效果。Lee^[7]曾利用 1 000 组从厂家样本和现场测量中得到的冷水机组数据, 对 6 种冷水机组经验模型进行评价, 结果表明 BQ 模型对于水侧不变流量的机组较准确, MP 回归模型对不同类型的机组数据均较理想。由表 4 可以发现, BQ 模型和 Gordon-NG 模型对于水侧不变流量的机组 (机组 A、B) 均比变流量的 (机组 C、D) 拟合效果好, 而 SL 模型、MP 模型、QHP 模型对于机组 D 的准确性在 4 个不同类型机组里均最好, 分析其原因, 可能是由于机组 D 的样本数据量最大, 涵盖的数据范围最广, 而 3 种模型均是经验模型, 全部基于统计意义, 所以, 这 3 种的模型对于机组 D 最理想。

QHP 模型对 4 类不同机组的拟合效果在 5 个模型中均为最理想, 但它的自变量有 20 个, 在对 4 类不同机组样本数据进行拟合时, 某些不显著的自变量加入模型后, 对于模型的拟合优度 (R^2) 增加并不大, 但却大大降低了模型整体的显著性 (F 值), 将这些自变量剔除^[10], 得到保留的自变量, 如表 5 所示, 由于 A、B、C、D 机组运行复杂程度依次提高, 影响机组运行性能的物理量越来越多, QHP 模型对于机组 A、B、C、D 保留的自变量数量依次增加, 且 5 个物理量的一次项均

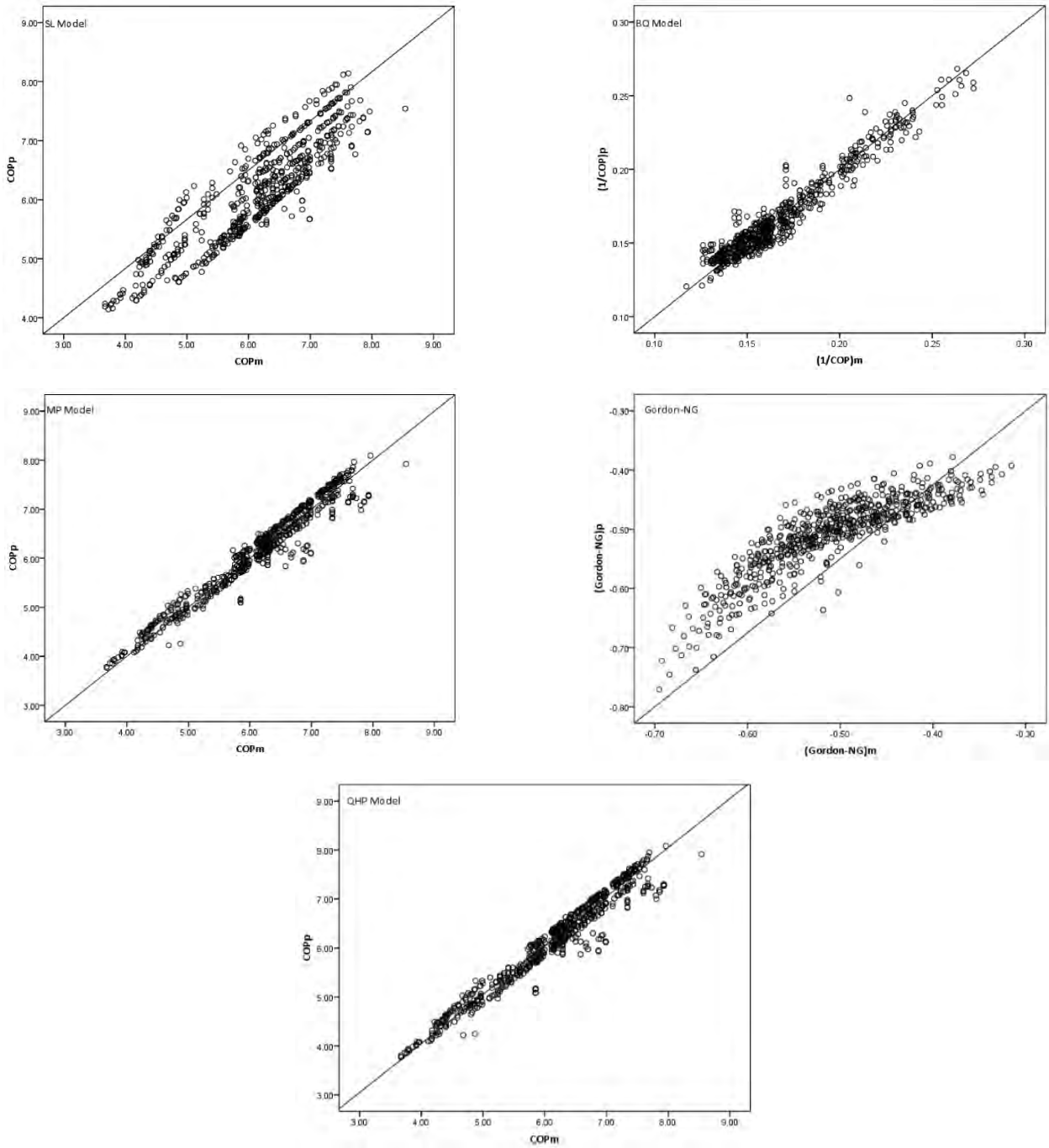


图4 机组 A 各个模型模拟值与实际值比较

Fig.4 Comparison between measured and predicted COP for chiller A

表5 QHP 模型保留的自变量

Table 5 Statistically significant parameters of QHP model

模型	机组	Q	T_{ei}	T_{eo}	T_{ci}	T_{co}	Q^2	T_{ei}^2	T_{eo}^2	QT_{ei}	QT_{eo}	QT_{ci}	QT_{co}	$T_{ei}T_{eo}$	$T_{ei}T_{ci}$	$T_{eo}T_{ci}$	$T_{eo}T_{co}$	$T_{ci}T_{co}$	
QHP	A	√	√	√	√	√	√		√	√	√					√		√	
	B	√	√	√	√	√	√		√	√	√					√		√	
	C	√	√	√	√	√	√	√	√	√		√		√	√	√			√
	D	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√		√	√	√		√

(下转第 52 页)

苯乙烯在四氯化碳溶剂中具有良好的溶解性,很快即可完全溶解于四氯化碳中,形成透明溶液。而无机填料增重聚苯乙烯泡沫塑料溶解过程中不断有白色颗粒状固体沉淀于烧杯底部。经过进一步的过滤、洗涤、干燥等操作可将无机填料从聚苯乙烯中分离出来,获得测试样品中无机填料的含量。

相较于直接燃烧法与热失重法,该方法更为安全、简便、易行,且不依赖于实验室条件,可快速地在现场对EPS板中是否含有固体无机填料进行鉴别,更适用于现场快速检测。

3 结语

为加快我国建筑节能减排的步伐,为人民创造安全的、健康的生活环境,保护合法企业的正当利益,国家相关部门曾开展多次打击假冒伪劣建材产品工作,并取得了较大收获。但由于缺乏现场快速检测方法,打击“假冒伪劣”产品仍主要依赖于实验室检测方法,检测周期相对较长。在市场经济和物流产业发展的带动下,产品市场流通较快,当发现产品质量问题时,部分问题产品已经被应用,并造成了人身伤害或严重的

经济损失。因此,开展绝热用聚苯乙烯泡沫塑料的现场快速检测技术研究,制定科学的、准确的、快速的检测方法任重而道远。

参考文献:

- [1]王恩,冯茹珠.谈建筑节能墙体保温材料的性能及应用[J].中华民居(下旬刊),2013,(8):191-192.
- [2]陈福广.积极发展适应节能建筑要求的优质绝热材料[J].新型建筑材料,2010,(6):44-46.
- [3]霍怡.EPS和XPS板的性能分析比较[J].建设科技,2011,(9):68-69.
- [4]金星海,霍智秀.建筑节能工程的质量问题与控制[J].辽宁建材,2011,(12):31-32.
- [5]陈淑英.浅论节能建筑存在问题及其应对措施[J].科技视界,2012,(27):257-258.

作者简介:张轶楠(1977),男,辽宁盖州人,毕业于沈阳建筑大学,高级工程师,科室副主任,工民建专业,主要从事保温材料、干粉砂浆的检测技术研究工作(Insyhg@163.com)。

(上接第20页)保留,机组A和机组B采用相同的自变量,为11个,机组C保留14个,机组D保留16个,而MP模型只有9个,且MP模型的拟合效果趋近于QHP模型, R^2 相差在 $\pm 2\%$ 之间,所以MP模型的鲁棒性相对于QHP模型更强。

5 结论

本文首先对离心式冷水机组一次线性模型(SL model)、二次线性回归模型(BQ model)、多元多项式回归模型(MP model)、Gordon-Ng模型、二次齐次多项式回归模型(QHP model)共5种黑箱模型和半经验模型进行分析,利用①定频、定流量,②变频、定流量,③变频、冷冻侧变流量、冷却侧不变流量,④变频、冷冻侧、冷却侧变流量4种类型的离心式冷水机组共4523组数据进行最小二乘拟合,对模型的准确性、适用性及鲁棒性进行评价,结果发现QHP模型对于4种不同类型的机组,模拟效果在5个模型中均最好, R^2 均在94%以上,但由于QHP模型采用更多的自变量,回归过程更加复杂,在数据量较多时可以采用MP模型采用更少的自变量,鲁棒性更强,且拟合效果趋近于QHP模型, R^2 与QHP模型相差在 $\pm 2\%$ 之间,QHP模型、MP模型相对于其他3种模型更为适用。

参考文献:

- [1]潘毅群.实用建筑能耗模拟手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2013:45.
- [2]Gordon J M, Kim Choon Ng. A general thermodynamic model for absorption chillers: theory and experiment[J]. Heat Recovery and CHP,1995,15(1):73-83.

- [3]Swider D J. A comparison of empirically based steady-state models for vapor-compression liquid chillers [J]. Applied thermal engineering,2003,23(5):539-556.
- [4]Lee T S, Lu W C. An evaluation of empirically-based models for predicting energy performance of vapor-compression water chillers[J]. Applied Energy,2010,87(11):3486-3493.
- [5]DOE (Department of Energy). DOE 2 Reference manual, part 1, version 2.1[M]. 1980, Berkeley, Calif.: Lawrence Berkeley National Laboratories.
- [6]Braun J E, Mitchell J E. Models for variable-speed centrifugal chillers[J]. ASHRAE Trans,1987,93(part 1):1794-1813.
- [7]T A Reddy, K K Andersen. An evaluation of classical steady-state off-line linear parameter estimation methods applied to chiller performance monitoring [J]. International Journal of HVAC&R Research,2002,8 (1): 101-124.
- [8]Lebrun J, J P Bourdouxhe, M Grodent. HVAC toolkit: Algorithms and subroutines for primary HVAC system energy calculations [C]. 1996, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- [9]Wong S P W, WANG S K. System simulation of the performance of a centrifugal chiller using a shell-and-tube-type water-cooled condenser and R-11 as refrigerant[J]. ASHRAE Trans,1989,95(Part 1):445-454.
- [10]王松佳.线性统计模型:线性回归与方差分析[M].北京:高等教育出版社,1999:87-92.

作者简介:田柏秋(1989),男,江苏人,供热、供燃气、通风与空调工程专业,从事建筑节能、建筑模拟等方向的研究(baiqiutian@gmail.com)。指导教师:潘毅群,同济大学教授,博士生导师。黄治钟,同济大学,高级工程师。