

大型制冷机组故障调查与分析*

广东工业大学 李志生[☆]

湖南大学 张国强

广东工业大学 李冬梅 刘旭红 梅 胜 王晓霞

摘要 介绍了制冷机组故障调查的方法、手段、时间、范围等,使用多种方法调查了制冷机组各部件的故障发生情况。同时,应用可靠性理论和故障率理论分析和总结了制冷机组的故障分布规律。所进行的调查和分析可为我国大型制冷机组行业提供有益的经验和基础数据。

关键词 制冷机组 故障 调查 分析

Fault investigation and analysis of large-scale chiller units

By Li Zhisheng[★], Zhang Guoqiang, Li Dongmei, Liu Xuhong, Mei Sheng and Wang Xiaoxia

Abstract Presents the fault survey methods, time and scope, and investigates faults occurred to components of chiller plants with a number of methods. Analyses the fault distribution with reliability and faults theory. The research provides some empiric and fundamental data for large-scale chiller unit industry.

Keywords chiller plants, fault, survey, analysis

★ Guangdong University of Technology, Guangzhou, China

①

0 引言

按照国际能源组织(IEA)Annex34 的定义,故障(fault)被定义为系统至少一个性能或参数出现与可接受的、正常的或标准的条件不允许的偏离^[1]。目前,国际上对暖通空调设备的故障调查的研究工作比较少,以前仅有少数学者曾经进行过类似的研究^[2-4]。国际上一般公认 Stouppe 和 Lau 对暖通空调和制冷机组作过最广泛的调查和研究^[5-7]。而国内进行这方面研究工作的学者就更少了,仅姜益强等人曾经对热泵的故障作过系统的调查和统计,到目前为止,还没有人对制冷机组尤其是大型水冷式制冷机组进行系统的故障调查与研究^[8]。基于上述原因,笔者对制冷机组的故障进行了广泛而详细的调研,这些调研包括两个方面:一是国内、外文献调研,本文主要调研了蒸汽压缩制冷(包括热泵型)机的故障发生情况,这些文献资料主要来源于 ASHRAE 的学报和国际会议论文、HVAC&R 学报、IEEE 会议论文、自动化国际杂志以及 IEA Annex25 及学位论文等。第二个是现

场调研,主要对以广州为代表的珠三角地区的大、中型制冷机组运行及故障情况进行了调查。

1 制冷机组故障调查的方法

为了进行合理的、科学的故障调查,所调查的样本必须具有代表性、典型性和通用性。在故障调查过程中,采用目前广泛使用的德尔菲(Delphi)法,即规定程序专家调查法^[9]。德尔菲法最早出现于 20 世纪 50 年代末,是当时美国为了预测其“遭受原子弹轰炸后,可能出现的结果”而发明的一种方法。德尔菲法本质上是一种反馈匿名函询法。其大致流程是:在对所要预测的问题征得专家的意见之后,进行整理、归纳、统计,再匿名反馈给各专家,再次征求意见,再集中,再反馈,直至得到稳定的意见。由此可见,德尔菲法是一种利用函询形式的集体匿名思想交流过程。它区别于其他专家预测方法的三个明显的特点是:1) 匿名性,匿名是德尔菲法的极其重要的特点,从事预测的专家不知道

①☆ 李志生,男,1972 年 11 月生,博士,副教授
510310 广州市新港中路 489 号佳信一街 72 号 A7-403
(020) 34224059
E-mail: Chinaheat@163.com
收稿日期:2007-10-08

* 广东工业大学博士基金项目(编号:083044),教育部高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助(教人司[2002]383 号)

有哪些人参加预测,他们是在完全匿名的情况下交流思想的;2) 多次有控制的反馈,小组成员的交流是通过回答组织者的问题来实现的,它一般要经过若干轮反馈才能完成预测;3) 小组的统计回答,最典型的小组预测结果是反映多数人的观点,少数派的观点至多概括地提及一下。

笔者所在课题组的成员根据调查目的编制了调查表格,然后向设备工程师、设备销售商和售后服务商以及业主发电子邮件、传真、打电话询问反馈。另外,为取得第一手资料,增强调查统计的准确性和多样性,也采取了其他的调查方式如现场调研的形式,通过两年多的实际调查,共发出电子邮件和传真 180 份,实际有效回收 79 份。另外,现场调查了 28 个现代商业项目的 91 台制冷机组(所调查的建筑安装有多台制冷机组,最多的安装有 8 台制冷机组),除此之外,还通过各种形式取得了 23 份关于制冷机组调试和运行的日志和维修记录。总之,课题组成员所采取的这些调查措施足以说明制冷机组的故障情况,具有较高的统计价值。图 1 说明了制冷机组故障调查与统计的方法和过程。

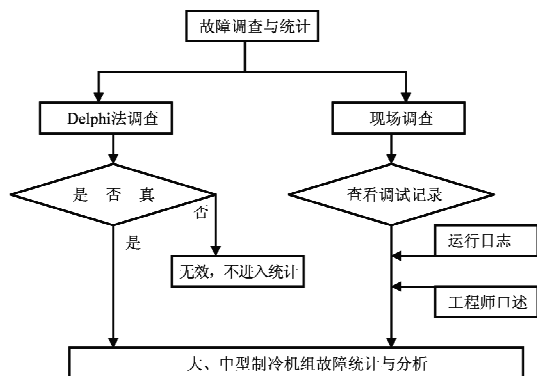


图 1 制冷机组故障调查与统计

2 制冷机组故障调查的内容

调查(统计)对象的容量是必须要考虑的重要问题,所统计的样本数必须能够满足数据的准确性要求。本研究主要面向建筑领域特别是大型商业建筑如现代化的写字楼、宾馆、会展中心、商场、体育馆等场所投入运行的制冷机组,没有涉及到工业项目的制冷机组。主要的调查内容包括三个方面。一是建筑的基本概况,包括建筑位置、建筑面积(空调面积)、层数、建筑的主要用途、空调的开启时间和规律等,这与制冷机组的故障没有太大的关系,主要是为别的课题进行的附带调查。二是制冷机

组的安装情况,主要包括制冷机组的品牌、型号、型式、安装台数(包括安装时间)、制冷剂种类、制冷剂的充注量、润滑油的类型和数量、制冷机组额定工况下的参数(输入功率、制冷量、冷水量、冷却水量、蒸发温度、冷凝温度、制冷系统的各种压力、电流、电压等)。三是制冷机组的实际运行情况,如运行时间、运行日志、维修记录等。

主要调查了华南地区(该地区是中国制造业最发达、也是中国空调应用最广的地区)的制冷机组的故障情况,采取的是抽样调查的方法,所涉及的城市包括广州、深圳、东莞和佛山。调查对象为上述 4 个城市中投入运行的大、中型水冷式制冷机组(单台制冷机组制冷量大于 175.85 kW(50 USRt),因为大型的制冷机组故障样本太少,故扩大制冷机组的范围),所涉及的制冷机组包括国、内外知名品牌,其形式有往复式、离心式、涡旋式和螺杆式等。

3 制冷机组故障统计与分析模型

3.1 故障率

制冷机组各设备的故障率 $\lambda(\tau)$ 可定义为当某设备已工作到 τ 时刻(保持运行条件不变),在下阶段的 $\Delta\tau$ 时间内发生故障的概率。如果某设备的寿命周期为 L ,可靠性为 $R(\tau)$,当设备工作到 τ 时刻后,在 $\Delta\tau$ 时间内发生故障的概率为 $P\{\tau < L \leq \tau + \Delta\tau\}$,则单位时间内发生故障的概率为

$$\lambda(\tau, \Delta\tau) = \frac{P\{\tau < L \leq \tau + \Delta\tau\}}{\Delta\tau} \quad (1)$$

根据条件概率的特性和极限知识进行推理,不难得到故障率的表达式:

$$\lambda(\tau) = \frac{-R'(\tau)}{R(\tau)} \quad (2)$$

式中 $R'(\tau)$ 为可靠性 $R(\tau)$ 的导数。

$0 \leq R(\tau) \leq 1, R(0) = 1$, 表示设备在开始时处于良好状态, $R(\tau)$ 是随时间 τ 变化的单调减函数。因此,故障率实际上就是表示设备工作到 τ 时刻后,单位时间内发生故障的概率。故障率越低,则可靠性越高。如果设备的寿命周期 L 用时间表示,则故障率的单位为时间的倒数,常用千小时的百分数($\%/10^3 \text{ h}$) $10^{-5}/\text{h}$ 来表示故障率^[10]。对大型制冷机组这种可靠性很高而故障率小的设备,甚至可以采用更小的单位菲特(Fit, failure unit) $10^{-9}/\text{h}$ 作为故障率的单位。

假设所调查的制冷机组的 $N_i (i=1, 2, 3, \dots)$

种设备从 $\tau=0$ 时刻开始工作(更换设备或新投入使用),所对应的每种设备到 τ 时刻时发生故障的数量为 $n_i(\tau)$,即 τ 时刻时没有发生故障的设备数量为 $N_i - n_i(\tau)$,又若在 $\Delta\tau$ 时间内有 $\Delta n_i(\tau)$ 个设备出现故障,则制冷机组各设备的故障率由式(1), (2)可以得到

$$\lambda_i(\tau) = \frac{\Delta n_i(\tau)}{(N_i - n_i(\tau))\Delta\tau} = \frac{n_i(\tau + \Delta\tau) - n_i(\tau)}{(N_i - n_i(\tau))\Delta\tau} \quad (3)$$

对式(2)进行整理、积分,可得到可靠性与故障率的关系式:

$$R(\tau) = e^{-\int_0^\tau \lambda(\tau) d\tau} \quad (4)$$

特别地,如果故障率 $\lambda(\tau)$ 为常数,则式(4)可以进一步简化为

$$R(\tau) = e^{-\lambda\tau} \quad (5)$$

3.2 制冷机组各部件寿命特征

1) 平均寿命 θ

平均寿命是最常用的寿命特征量,一般是对所考虑的产品总体而言的。对于有 N 个设备的总体,其平均寿命可用式(6)表示:

$$\theta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_i \quad (6)$$

式中 τ_i 为每个设备发生故障前的工作时间; N 为设备数量。

在概念上,平均寿命对于不可修复设备和可修复设备的含义不同。对于不可修复设备,平均寿命就是故障前平均工作时间 $MTTF$,则

$$\theta = MTTF = \int_0^{+\infty} R(\tau) d\tau = \int_0^{+\infty} \exp\left[-\int_0^\tau \lambda(\tau) d\tau\right] d\tau \quad (7)$$

对于 $\lambda(\tau)$ 为常数的指数分布,根据可靠度函数有

$$R(\tau) = e^{-\lambda\tau} = e^{-\frac{\tau}{\theta}} = e^{-\frac{\tau}{MTBF}} \quad (8)$$

此时,平均寿命与故障率的关系为

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (9)$$

式(8),(9)中 $MTBF$ 指平均故障时间间隔,对可修复设备,平均故障间隔时间就是平均寿命 θ ,对不可修复设备,平均寿命 θ 就是故障前平均工作时间 $MTTF$ 。

2) 可靠寿命

可靠寿命就是当设备的可靠度为给定值 r 时

的设备寿命,用 τ_R 表示,其中 R 称为可靠水平。可靠寿命的观察值是能完成规定功能的设备的比例恰好等于给定可靠度时所对应的时间。一般情况下,可靠寿命 τ_R 是可靠度函数 $R(\tau)$ 的反函数:

$$\tau_R = R^{-1}(\tau) \quad (10)$$

对于 $\lambda(\tau)$ 等于常数的指数分布,由于 $R(\tau_R) = e^{-\lambda\tau_R} = R$, 则

$$\tau_R = -\frac{1}{\lambda} \ln R \quad (11)$$

4 结果与讨论

制冷设备的结构、性质、工作环境和使用条件决定了故障率的类型,制冷机组的大多数部件的故障率属于递增型。制冷机组常见的故障有 80 多种,压缩机的故障种类最多,超过 20 种。表 1 是制冷机组系统中各部件的故障调查统计情况。

表 1 制冷机组系统中各部件故障调查统计

故障种类	设备名称	故障名称/常见故障	出现频率/%
电气、控制故障	各种传感器、变送器	失效、无动作、超出信号范围	11
	控制主板	失去通讯、无响应、设定错	8
	电流、电压开关	过载、失衡、反向、缺相	32
机械故障	其他		12
	压缩机	油压低、内部泄漏、卡死、压力异常、温度异常	6
	冷凝器	结垢、冷却水量少(多)、温度异常、压力异常	4
	蒸发器	结垢、冷水量少(多)、温度异常、压力异常	10
	膨胀阀	卡住、开度异常、堵塞	3
	制冷系统管路	堵塞	3
	制冷剂	泄漏、充注过多	6
	其他		5

从表 1 可知,大型制冷机组电气、控制方面的故障占 63%,而机械方面的故障占 37%。电气、控制方面的故障占了绝大多数,最常见的故障原因是过载、失衡、反向和缺相等,出现频率达 32%。高压电路和供、配电方面的故障主要有三相电动机相位顺序反相(造成压缩机反转)、压缩机电动机温度过高、电动机电流过载、电动机的绝缘受到破坏、线路短路、电动机受到制冷剂污染、高压开关过载、三相电流缺相、三相电压(或电流)失衡超过额定值。如果是安装了 Y- Δ 启动装置的,还有可能造成 Y- Δ 启动失败的故障。以上这些故障毫无例外会造成压缩机立即停机。机械方面的故障,以蒸发器所占的故障最多,占到了 10%,主要原因是结垢、冷水量过多或过少、温度或压力异常;其次是压

缩机和制冷剂充注方面的故障,占第 2 位,都达到 6% 的比例。Stoupe 和 Lau 曾经花了 8 年(1980—1987 年)的时间,调查了 15 760 个故障失效的例子^[3]。在这些失效中,涉及到电方面的故障如电动机、控制装置和电子仪表的有 11 349 个,涉及到机械方面的如压缩机、管路系统和容器的故障有 4 411 个。

水流开关(总数为 10 个)在 6 年内发生故障的情况如表 2 所示。从表 2 可知,安装在制冷机组上的水流开关使用 1 年后,故障率是逐年增加的,说明水流开关随着使用年限的增加,磨损增加,发生故障的概率越来越大。从表 2 还可以得知,水流开关从第 2 年起,故障率是缓慢而平稳地增加。

表 2 水流开关的故障率

使用时间/a	$n_i(\tau)/\text{台}$	$\Delta n_i(\tau)/\text{台}$	$\lambda(\tau)$	
			$/(\%/a)$	$/(\%/10^3h)$
0		0	0	0
1	0	1	10	1.142
2	1	0	0	0
3	1	1	11.1	1.268
4	2	1	12.5	1.427
5	3	1	14.3	1.631
6	4			

对制冷机组各部件的故障情况按使用时间进行进一步的归类和分析,可以得出各部件的故障率情况(见表 3~9)。从表 3 可知,从第 5 年开始压缩机的故障率急剧上升。

表 3 压缩机的故障率

使用时间/a	设备数量	故障设备数量	新增故障数量	$\lambda(\tau)$	
				$/(\%/a)$	$/(\%/10^3h)$
1	91	1	1	1.1	0.13
2	91	3	2	2.3	0.26
3	91	5	2	2.3	0.26
4	91	6	1	1.2	0.13
5	91	10	4	4.9	0.56

表 4 冷凝器的故障率

使用时间/a	设备数量	故障设备数量	新增故障数量	$\lambda(\tau)$	
				$/(\%/a)$	$/(\%/10^3h)$
1	104	0	0	0	0
2	104	2	2	2	0.22
3	104	3	1	1	0.11
4	104	5	2	2	0.22
5	104	5	0	0	0

表 5 膨胀阀的故障率

使用时间/a	设备数量	故障设备数量	新增故障数量	$\lambda(\tau)$	
				$/(\%/a)$	$/(\%/10^3h)$
1	102	1	1	1	0.11
2	102	2	1	1	0.11
3	102	3	1	1	0.11
4	102	4	1	1	0.11
5	102	4	0	0	0

表 6 蒸发器的故障率

使用时间/a	设备数量	故障设备数量	新增故障数量	$\lambda(\tau)$	
				$/(\%/a)$	$/(\%/10^3h)$
1	104	3	3	3	0.34
2	104	5	2	2	0.24
3	104	7	2	2.1	0.24
4	104	10	3	3.1	0.35
5	104	12	2	2.2	0.25

表 7 管路、制冷剂的故障率

使用时间/a	设备数量	故障设备数量	新增故障数量	$\lambda(\tau)$	
				$/(\%/a)$	$/(\%/10^3h)$
1	77	1	1	1.3	0.15
2	77	4	3	4	0.47
3	77	5	1	1.4	0.16
4	77	9	4	5.6	0.67
5	77	11	2	3	0.35

表 8 电流、电压控制开关的故障率

使用时间/a	设备数量	故障设备数量	新增故障数量	$\lambda(\tau)$	
				$/(\%/a)$	$/(\%/10^3h)$
1	128	3	3	2.4	0.27
2	128	12	9	7.2	0.82
3	128	18	6	5.2	0.63
4	128	28	10	9.1	0.11
5	128	40	12	11.2	1.37

表 9 控制主板的故障率

使用时间/a	设备数量	故障设备数量	新增故障数量	$\lambda(\tau)$	
				$/(\%/a)$	$/(\%/10^3h)$
1	117	2	2	1.7	0.2
2	117	3	1	0.9	0.1
3	117	5	2	1.8	0.2
4	117	7	2	1.8	0.2
5	117	10	3	2.8	0.3

从表 4、5 可知,冷凝器、膨胀阀第 2~4 年间故障率变化不大,从表 6 可知,蒸发器的故障率呈缓慢逐年上升的趋势(仅第 5 年例外),从表 7 可知,管路、制冷剂方面的故障总体随时间增加而增加,但从第 4 或第 5 年开始,故障率不再明显增加。根据表 8~9 可知,电流、电压开关和控制主板的故障率逐年缓慢上升。因此,从表 2~9 可以得知,总体上各种设备故障率随时间增加而增加,但到第 5 年增加不是很明显或有个别下降。电流、电压开关的故障率最高,膨胀阀、冷凝器等方面的故障率最低,最高和最低可能会相差一个数量级。水流开关属于故障率比较高的部件,但表 2 显示其故障率非常高,与国外的文献有些不一致,应该是样本数量比较少的缘故。

对制冷机组来说,其寿命分布可以用指数型分布规律来表示。表 10 给出了制冷机组各部件的平均寿命和可靠寿命。这里需要特别指出的是,表 10 中制冷机组各部件的平均寿命与平时所说的某部件的平均寿命××年是两码事。例如,在某些文献中,压缩机的平均寿命 15 年,指的是所统计的压缩机

表 10 制冷机组各部件的寿命

设备名称	平均寿命/a	可靠寿命/a
控制主板	35.8	1.1
电流、电压控制开关	71.5	2.41
管路、制冷	33.3	1.0
蒸发器	45.5	1.37
膨胀阀	100	3
冷凝器	50	1.5
压缩机	20.5	0.61

中,出现了机械故障或报废的那些压缩机的平均使用年限,而表 10 的寿命是新设备(包括旧设备修复后)距离下次故障出现的时间,并不是指机械故障,而是从故障率和可靠度方面来评价某一故障。

5 结论

制冷机组常见的故障有 80 多种,其中压缩机的故障达 20 多种,属于故障种类最多的部件。在制冷机组所有的故障之中,压缩机的平均寿命和可靠寿命都是最短的,维修成本也是最高的。如果把制冷机组的故障分为机械故障和电气故障两大类,则电气方面的故障更多,故障率更大,但机械方面的故障所造成的损失更大。膨胀阀的平均寿命最长,而压缩机的可靠寿命最短。

参考文献:

- [1] International Energy Agency (IEA). Demonstrating automation fault detection and diagnosis methods in
 (上接第 95 页)

包含输配系统冷(热)损失在内,全年冷(热)源设备提供的冷(热)量与冷(热)源设备供冷(供热)能力之比,称为全年满负荷当量运行时间。

以日本东京的设计负荷指标、全年累计负荷指标为基准数据,采用 HASS112 和 HASP 计算模拟软件对日本全国典型地区进行分析,得出区域系数。再通过基准数据与区域系数的乘积,推导日本全国各地的设计负荷与全年累计负荷指标。区域系数见表 3。

表 3 冷热负荷区域系数^[2]

	设计负荷		全年累计负荷	
	冷负荷	热负荷	冷负荷	热负荷
北海道	0.8	1.5(1.0)	0.5(0.6)	2.4(1.6)
东北	0.9	1.3	0.7	1.4
北陆	1.0	1.1	0.9	1.4
关东	1.0	1.0	1.0	1.0
东海	1.0	1.0	1.1	0.9
近畿	1.0	1.0	1.1	0.9
中国	1.0	1.0	1.1	0.9
四国	1.0	1.0	1.1	0.9
九州	1.0	1.0	1.2	0.7
冲绳	1.1	0.5	1.5	0.07

注:1) 括号内数值指采用高标准保温措施时的数值;

2) 表中的“中国”指日本本州岛的中国地区。

5 结论

real buildings [R]. Finland: Technology Research Center of Finland, 2001: 47-51

- [2] Krafthefer B, Rask D, Bonne U. Air-conditioning and heat pump operating cost saving by maintaining coil cleanliness [G] // ASHRAE Trans, 1987, 93 (1): 1458-1473
- [3] Stoupe D E, Lau Y S. Air conditioning and refrigeration equipment failures [J]. National Engineer, 1989, 93(9): 14-17
- [4] 李志生, 张国强, 刘建龙. 暖通空调系统故障检测与诊断研究进展[J]. 暖通空调, 2005, 35(12): 31-38
- [5] Breuker M, Rossi T, Braun J. Smart maintenance for rooftop units [J]. ASHRAE Journal, 2000, 42 (11): 41-47
- [6] Isermann R. Process fault detection based on modeling and estimation—a survey [J]. Automatica, 1984, 20(4): 387-404
- [7] Stylianou Meli. Application of classification functions to chiller fault detection and diagnosis [G] // ASHRAE Trans, 1997, 103(1): 645-656
- [8] 姜益强. 空气源热泵冷热水机组故障分析与诊断建模[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002: 35-61
- [9] 徐蔼婷. 德尔菲法的应用及其难点[J]. 中国统计, 2006, 54(9): 57-59
- [10] 王社伟. 容错导航系统的可靠性分析[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1999: 25-47

5.1 浅析了日本在区域供冷供热系统冷热源规划阶段负荷预测的基本思路,反映了日本的用能水准与状况。日本的经验对做好我国大中型建设工程冷热源规划是十分有益的。

5.2 对于不同设计阶段应采用不同精度的计算方法。在方案设计阶段,可以采用设计负荷指标和全年累计负荷指标以及逐时、逐月负荷变化系数,估算各类功能建筑的逐时负荷变化规律,从而经济合理地确定冷热源方案。

5.3 对于既有建筑采集系统参数,统计出各类功能建筑的冷负荷、热负荷、生活热水加热负荷和用电负荷设计指标与全年累计负荷指标,以及相应的逐时、逐月负荷变化系数是一项重要工作。

5.4 采用基准数据和区域系数的乘积,确定其他区域的设计负荷与全年累计负荷是实测与计算相结合的基础性工作,有利于提高负荷预测的工作效率。

参考文献:

- [1] 日本空气调节卫生工学会. 空气调节设备设计篇空气调节卫生工学会便覧[M]. 13 版. 东京, 2001
- [2] 日本区域供冷供热协会. 区域供冷供热技术手册[M]. 新版. 东京, 2002