

冷风机除霜始点的优化控制

葛茂泉 周红

(上海水产大学食品科学技术系, 200090)

提 要 本文以小型冷库的冷风机为具体研究对象, 对冷风机运行过程中因结霜引起的电机电流、风机转速、蒸发温度和进出风压差等特性参数的变化规律, 进行了实验研究和理论分析。提出了冷风机节能除霜始点优化控制方案及其工艺条件。结果表明, 正确选择表征结霜状态的特性参数和优化的除霜工艺条件, 对节约能源和提高制冷装置自动化程度, 具有重要意义。

关键词 冷风机, 除霜始点, 特性参数, 优化控制

在空气析湿冷却工况下运行的冷风机, 换热表面迅速被霜层覆盖。霜层的不断成长, 导致蒸发器特性的不断变化。这种变化主要表现在空气流动特性和传热效率两个方面^[4]。

冷风机换热表面霜层的成长过程, 不断地改变着表征空气流通断面几何尺寸的净空截面积 A_{min} 、盘管水力直径 d_n 的大小, 以及影响摩擦系数的最小截面风速 W_c 的高低; 同时, 也不断改变着决定导热系数的热阻 R , 以及影响空气侧换热系数的传热当量直径 d_e 的大小。其结果, 造成空气容积流量急剧下降, 压力损失急剧上升, 蒸发器传热系数迅速恶化^[6]。如不及时除霜, 势必影响冷间空气正常循环, 造成冷间温度的超限波动。不仅增加制冷装置运转的电耗, 而且降低冷加工或冷藏食品的质量。

众所周知, 对于冷风机的除霜, 无论是采用淋水方式、电加热方式, 抑或是采用制冷剂热蒸汽循环方式, 都要以消耗电能和增加冷间热负荷作为恢复冷风机正常的空气流动特性和传热效率的代价。

节能除霜的关键, 不仅取决于除霜方法本身, 同时还必须正确选择除霜的起始时间。因为积霜太厚而不及时除霜, 不仅会降低冷风机的制冷效率, 并且在环境温度波动条件下使霜层密度不断增大, 造成除霜困难^[5]; 而除霜频率太高, 又会浪费能源和造成食品冷加工或冷藏工艺过程的过多中断。在上述两种情况之间, 必然存在既能保持冷风机较高的制冷效率, 又可节约能源的最佳除霜始点。

本文主要研究运用什么手段正确地决定冷风机节能除霜的始点, 及其最佳工艺条件。

1 冷风机除霜始点测定方法分析

换热表面结霜既然改变了冷风机运行的空气流动特性和传热效率, 就应该存在表征这一变化过程的特性参数。采用不同的特性参数, 得出不同的测定方法。

1992-12-15 收到。

1.1 以冷风机运行时间作为目标特性参数

人们根据对冷风机结霜过程中蒸发器传热和空气动力性能变化规律的观察，经验性地确定除霜时间间隔，进行手动或自动除霜操作，即为我国食品冷藏企业普遍采用的定时除霜方法。然而，由于冷风机运行的环境条件及冷间热负荷无时不在变化，冷加工或冷藏对象又多种多样，简单的时间座标不可能准确地反映冷风机的结霜规律。所以定时除霜虽然也可以周期地恢复冷风机原有性能，却难以实现节能高效的理想目标。

1.2 以冷风机进出风压差作为目标特性参数

沿蒸发器排深方向流动的空气流，由于冷却盘管和翅片产生的阻力，形成进出风压差。换热表面结霜后，空气流通断面的几何形状发生变化，进出风压差进一步扩大。霜层越厚，进出风压差越大。因此，可以把进出风压差作为客观反映换热表面霜层厚度的目标特性参数。只要配备合适的压差测量仪器，即可据此测定冷风机的除霜始点⁽¹⁾。

1.3 以制冷剂蒸发温度作为目标特性参数

换热表面结霜，改变了管壁的传热阻和冷却盘管的传热当量直径，导致传热系数降低，换热量减少。在制冷压缩机制冷能力不变的条件下，势必造成蒸发温度下降，冷间空气温度与蒸发温度的温差加大，以求达到压缩机制冷能力与冷风机制冷能力的平衡。霜层越厚，蒸发温度降低越多。因此，也可以把蒸发温度作为测定冷风机除霜始点的目标特性参数。

1.4 以霜层厚度作为目标特性参数

根据实践经验或理论计算结果，得出冷风机蒸发器传热及空气动力特性与霜层厚度之间的关系，确定除霜操作的霜层经济厚度。当霜层达到既定厚度时，由安装在换热表面的霜层厚度检测仪发出除霜操作指令。

1.5 以冷风机的风机特性作为目标特性参数

本文以普遍采用的轴流式风机为例，分析冷风机运行过程中风机特性的变化规律。

冷风机蒸发器与鼓风机联合工作的风机-蒸发器系统工况特性曲线，如图 1 所示^[5]。

冷风机投入运行初期，是在干式等湿冷却工况下工作。这时的系统阻力最小，其阻力特性曲线为 ΔP_{zs} ，工作点为 B，风机容积流量 Q_B 最大。随后进入析湿冷却工况，阻力特性曲线向左上方移动，其工作点沿风机外特性曲线 P 向左移至 C，阻力特性曲线变为 ΔP_{zc} 。工作点继续左移至 D，阻力特性曲线变为 ΔP_{zd} ，则进入结霜工况。在此阶段之前，风机容积流量 Q 逐次减少，而风机全压却呈上升趋势。在工作点 D 之后，霜层厚度逐渐增加，阻力特性曲线继续左移，工作点呈下滑趋势。此时，风机容积流量 Q 和全压 P 同步降低，并且由霜层造成的附加

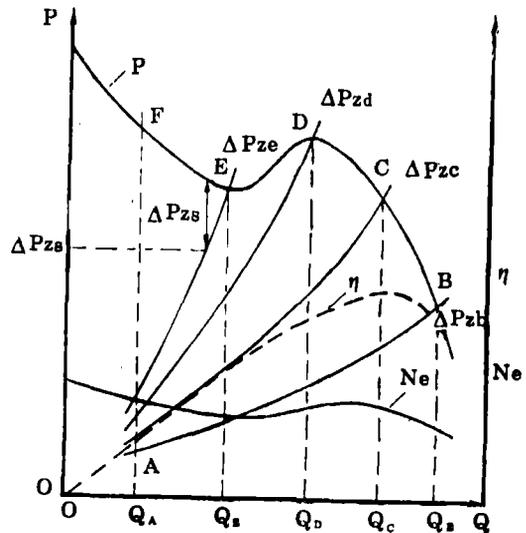


图 1 风机—蒸发器系统变工况特性曲线
Fig 1 Characteristic curve for variable working parameters in blower-evaporator system

(1) Gatchilov, T. S. 等, 1981. 在结霜工况下翅片式空冷器的结构形状及其运行. 第十五届国际制冷大会论文译丛(中册), 356-358. 《制冷学报》编辑部.

阻力 ΔP_s 也逐渐增大。当工作点通过 E 之后, 风机容积流量继续降低, 而风机全压 P 又开始上扬。直到 F 点, 风机容积流量达到最低值 Q_A 。

由此可见, 冷风机运行过程中, 风机容积流量由最大值 Q_B 向最小值 Q_A 变化, 风机全压则在初期上升, 结霜后下降, 随后又上升。风机—蒸发器系统的工作点在 $ABFA$ 区域内移动, 即所谓冷风机变工况运行过程。

冷风机在变工况运行过程中, 风机电机的转矩和转速也随负载的变化而变化^[2]。异步电机转矩与转速的关系, 如图 2 所示。

风机电机的转矩 M_r 由式(1)定义。

$$W_r = \frac{PQ\rho}{\eta} \quad (1)$$

式中 P ——风机全压;
 Q ——风机容积流量;
 ρ ——空气密度;
 η ——风机效率。

异步电机的转矩, 由式(2)定义。

$$M_a = \frac{KI_2^2}{n_1 - n} \quad (2)$$

式中 K ——常数;
 I_2 ——转子等效电流;
 n_1 ——磁场转速;
 n ——转子转速。

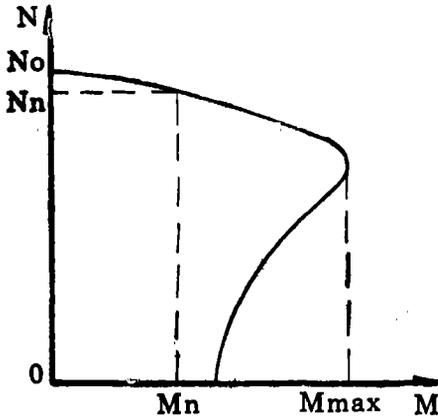


图 2 异步电机转矩与转速特性曲线
 Fig.2 Characteristic curve for asynchronous motor torque and rotator speed

如果忽略摩擦阻力, 则式(1)=式(2), 即

$$\frac{PQ\rho}{\eta} = \frac{KI_2^2}{n_1 - n} \quad (3)$$

对照图 1、图 2 及式(3)可知, 风机工作点由 B 移至 D , 全压 P 增加很快。由于此时密度 ρ 和风机效率 η 变化较小, 风机容积流量 Q 虽然降低, 但 P 与 Q 的乘积仍呈增大趋势。因此, 转矩 M_r 增大。从图 2 可知, 转矩 M_r 增大导致转速 n 降低; 从式(3)可知, 转矩 M_r 增大及转速 n 降低, 导致电流 I_2 上升。当风机工作点向 E 方向移动时, Q 、 P 和 η 都呈下降趋势, 从而导致 M_r 下降, I_2 下降, n 反而上升。当风机工作点由 E 向 F 移动时, Q 呈缓慢下降趋势, 而 P 上升较快, 从而导致 M_r 上升, I_2 上升, n 则下降。

综上所述可知, 风机转速及电机电流的变化有一定规律可循, 能够反映冷风机工作特性的变化特点, 亦即能够反映换热表面的结霜状态。因此, 以风机转速和电机电流^[1]作为测定除霜始点的目标特性参数是完全可行的。

2 实验装置和仪器设备

2.1 实验装置

本课题以上海水产大学食品科学技术系食品工程中心实验室的装配式冷库内使用的冷风机为研究对象, 实验装置如图 3 所示。

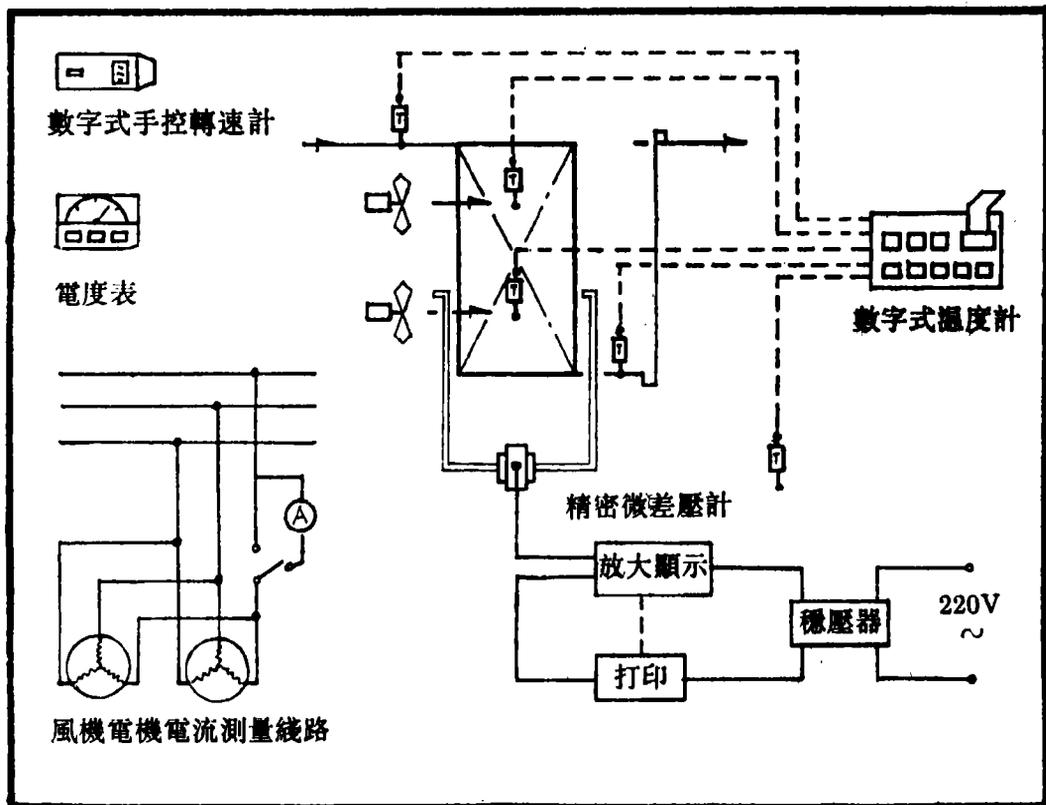


图3 实验装置示意图

Fig.3 Schematic diagram for experimental equipment

2.2 实验用仪器、设备

装配式冷库, 5吨/每次; 制冷剂及制冷系统, R_{12} 、热力膨胀阀直流供液; 制冷压缩机, F6.5型活塞式制冷压缩机; 冷风机, 翅片式盘管, 蒸发面积 25m^2 , 配 DE-2.5型风机两台, 每台 $N=0.5\text{kW}$, $Q=1200\text{m}^3/\text{h}$, $P=59\text{Pa}$, 采用电加热器除霜, $N=3.6\text{kW}$; 精密微压差计, 测量范围: 压差 $\pm 0.01\text{bar} \sim 0.1\text{bar}$, 测温范围: $-20 \sim +60^\circ\text{C}$, KWS-3073型, 西德 HBM 制造; 数字式温度计, 2240C型 DATALOGGER, 美国 FLUKE 制造; 数字式手控转速计, HT-446型, 日本(株)小野测器制造; 电流表, 0.5级, 量程1安培; 电度表; 稳压电源; 毕托管等。

3 实验数据处理及结果讨论

3.1 冷风机进出风压差与换热表面结霜状态的关系

3.1.1 实验数据处理

每隔0.5小时测量一次, 测量数据采用瞬时压差最高值, 编制计算机程序进行数据处理。程序清单如下。

```

10 SCREEN 2:CLS:KEY OFF
20 DIM SJ(49), YL(49)
30 FOR I=1 TO 49
40 READ SJ(I), YL(I)
50 NEXT I
60 X0=50:Y0=160:X1=450:Y1=Y0:X2=X0:Y2=30
70 NX=12:NY=4:DX=X1-X0:DY=Y0-Y2
80 DDX=DX/NX:DDY=DY/NY
90 CLS
100 PSET(X0, Y0)
110 DRAW "Nr450 Nu140"
120 FOR I=1 TO NX
130 LINE(X0+I*DDX, Y0)-(X0+I*DDX, Y0-3)
140 NEXT I
150 FOR I=1 TO NY
160 LINE(X0, Y0-I*DDY)-(X0+5, Y0-I*DDY)
170 NEXT I
180 SX=DX/24:SY=DY/(70-(30))
190 PSET(X0+SJ(1)*SX, Y0-(YL(1)(30)*SY)
200 FOR I=2 TO 49
210 LINE-(X0+SJ(I)*SX, Y0-(YL(I)-30)*(SY)
220 NEXT I
230 DATA 0,32,0.5,35,1,37,1.5,39,2,41,2.5,43,3,44,3.5,46,4,48,4.5,49
240 DATA 5,50,5.5,52,6,53,6.5,54,7.5,55,8,56,8.5,57,9,58,9.5,58
250 DATA 10,59,10.5,59,11,60,11.5,60,12,61,12.5,61,13,62,13.5,62,14,63,14.5,62
260 DATA 15,64,15.5,63,16,64,16.5,65,17,66,17.5,65,18,66,18.5,67,19,67,19.5,66
270 DATA 20,66,20.5,67,21,67,21.5,67,22,67,22.5,67,23,67,23.5,67,24,67
280 IF INKEY$="" THEN 280
290 END

```

3.1.2 P-T 关系曲线讨论

实验结果如图 4 所示。

(1) 实验所得 P-T 曲线,较准确地反映了换热表面的结霜状态,证明了以冷风机进出风压差作为测定除霜始点特性参数的可行性。

(2) 根据现场目测,冷风机换热表面结霜状态在整个空气流通断面存在不均匀性。说明选择不同的测压点可能得出不同的 P-T 曲线和不同的特性参数值。难以由一套测量装置反映整体结霜的实际状态,给工业实用带来一定困难。

(3) 由于压差变化幅度不是很大,对微压差计的测量精度要求较高。在冷风机台数较多的大中型冷库中应用投资额较大。

(4) 测压元件在低温环境里应用,容易堵塞和老化。

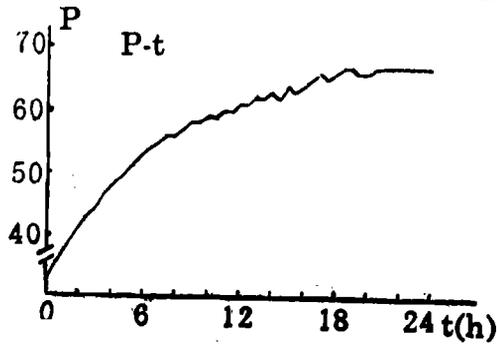


图4 P-T关系曲线

Fig.4 P-T relation curve

3.2 风机转速与换热表面结霜状态的关系

3.2.1 实验数据处理

每隔 0.5 小时采集一次测量数据,编制计算机程序进行数据处理。程序清单如下。

```

10 SCREEN 2:CLS:KEY OFF
20 DIM SJ(61),YL(61)
30 FOR I=1 TO 61
40 READ SJ(I),YL(I)
50 NEXT I
60 XO=50:YO=160:X1=450:Y1=YO:X2=XO:Y2=30
70 NX=15:NY=4:DX=X1-XO:DY=YO-Y2
80 DDX=DX/NX:DDY=DY/NY
90 CLS
100 PSET (XO,YO)
110 DRAW "Nr500Nu140"
120 FOR I=1 TO NX
130 LINE (XO+I*DDX,YO)-(XO+I*DDX,YO-3)
140 NEXT I
150 FOR I=1 TO NY
160 LINE (XO,YO-I*DDY)-(XO+5,YO-I*DDY)
170 NEXT I
180 SX=DX/30:SY=DY/40
190 PSET (XO+SJ(1)*SX,YO-YL(1)*SY)
200 FOR I=2 TO 61
210 LINE-(XO+SJ(I)*SX,YO-YL(I)*SY)
220 NEXT I
230 DATA 0,33,0.5,32,1,30,1.5,31,2,30,2.5,28,3,29,3.5,28,4,27,4.5,26
240 DATA 5,27,5.5,25,6,25,6.5,26,7,24,7.5,25,8,23,8.5,22,9,23,9.5,21
250 DATA 10,20,10.5,19,11,18,11.5,17,12,18,12.5,16,13,14,13.5,15,14,18,14.5,15
260 DATA 15,16,15.5,15,16,13,16.5,13,17,12,17.5,13,18,13,18.5,15,19,13,19.5,14
270 DATA 20,16,20.5,31,21,32,21.5,30,22,31,22.5,29,23,29,23.5,28,24,27,24.5,24
280 DATA 25,25,25.5,22,26,23,26.5,21,27,19,27.5,20,28,18,28.5,19,29,20,29.5,18

```

```

290 IF INKEY$="" THEN 290
300 NATA 30,15
310 END

```

风机转速与换热表面结霜状态的关系曲线,如图 5 所示。

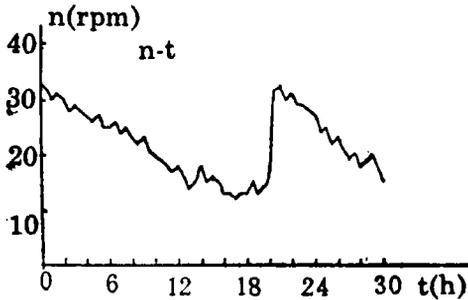


图 5 N-T 关系曲线

Fig.5 N-T relation curve

3.2.2 N-T 曲线图讨论

(1) 风机转速在冷风机变工况运行过程中的升降规律,与理论分析一致,可以作为测定除霜始点的特性参数。

(2) N-T 关系曲线变化幅度不大,而且要求对每台冷风机的风机进行连续测量,在实用中有一定难度。

(3) 风机转速受电网电压波动的干扰较大。

3.3 风机的电机电流与换热表面结霜状态的关系

3.3.1 实验数据处理

每隔 0.5 小时采集一次测量数据,编制计算机程序进行处理。程序清单如下。

```

10 SCREEN 2:CLS:KEY OFF
26 DIM SJ(61),DL(61)
30 FOR I=1 TO 61
40 READ SJ(I),DL(I)
50 NEXT I
60 XO=50:YO=160:X1=450:Y1=YO:X2=XO:Y2=30
70 NX=15:NY=4:DX=X1-XO:DY=YO-Y2
80 DDX=DX/NX:DDY=DY/NY
90 CLS
100 PSET (XO,YO)
110 DRAW "Nr500Nu140"
120 FOR I=1 TO NX
130 LINE (XO+I*DDX,YO)-(XO+I*DDX,YO-3)
140 NEXT I
150 FOR I=1 TO NY
160 LINE (XO,YO-I*DDY)-(XO+5,YO-I*DDY)
170 NEXT I
180 SX=DX/30:SY=DY/(640-560)
190 PSET (XO+SJ(1)*SX,YO-(DL(1)-(560))*SY)
200 FOR I=2 TO 61
210 LINE -(XO+SJ(I)*SX,YO-(DL(I)-(560))*SY)
220 NEXT I
230 DATA 0,560,0.5,568,1,569,1.5,570,2,575,2.5,585,3,594,3.5,598,4,605,4.5,608
240 DATA 5,614,5.5,618,6,614,6.5,615,7,620,7.5,624,8,628,8.5,625,9,630,9.5,628

```

```

250 DATA 10,628,10.5,630,11,632,11.5,630,12,637,12.5,635,13,634,13.5,635
260 DATA 14,632,14.5,636,15,635,15.5,638,16,636,16.5,638,17,639,17.5,640
270 DATA 18,638,18.5,639,19,640,19.5,638,20,634,20.5,572,21,565,21.5,567
280 DATA 22,569,22.5,570,23,572,23.5,574,24,578,24.5,576,25,578,25.5,580
290 DATA 26,582,26.5,580,27,585,27.5,592,28,595,28.5,602,29,606,29.5,614
300 DATA 30,618
310 IF INKEY$="" THEN 310
22 END

```

风机的电机电流与换热表面结霜状态的关系曲线,如图6所示。

3.3.2 I-T关系曲线讨论

(1) 以风机的电机电流为除霜始点测定的特性参数^[1],变化规律清楚,测量方法简单,投资少,检测仪器不必和冷风机本体接触,避免了低温高湿环境下外界因素的干扰,可以准确地反映冷风机换热表面结霜的整体状况。

(2) 测量数据易受电网电压波动的影响。但实验证明,在电压波动值不大于 $\pm 10\%$ 的条件下,误差小于 $\pm 10\%$,仍在允许范围内。

3.4 制冷剂蒸发温度与换热表面结霜状态的关系

实验过程中发现,制冷剂蒸发温度除受霜层厚度的影响外,还受室外大气温度、库门开闭、进出货物、操作人员等多种因素的干扰,在生产过程中难以区分是那种因素起决定性作用。因此,本实验放弃了这种测定方法。

3.5 直接测量冷风机换热表面霜层厚度

本实验使用手工现场测量方法。因换热表面结霜厚薄不均,难以找到能够定量地反映全局结霜状态代表性的测量位置,而且直尺目测读数误差太大。纵使采用霜层测厚仪器,也难以克服上述缺陷。所以本实验也放弃了这种测定方法。

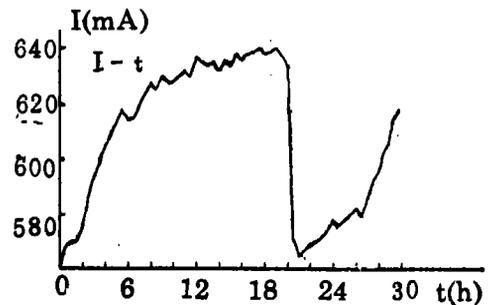


图6 I-T关系曲线

Fig.6 I-T relation curve

4 特性参数数值寻优

4.1 数据处理方法

以冷风机电耗(包括压缩机在内的整套制冷装置电耗)为目标函数,冷风机运行时间为变量,以实验数据为依据计算寻优。求出电耗最小的除霜时间间隔及相应的风机电机电流、风机转速、冷风机进出风压差等特性参数值。

首先,根据经验初选时间间隔初值 t_0 进行实验,求出冷风机每日电耗 N_0 。再选定时间间隔为 $t_1 = t_0 - 0.5t_0$ 进行实验,求出每日电耗 N_1 ,若 $N_1 > N_0$,则选定时间间隔为 $t_2 = t_0 + 0.5t_0$ 进行实验,求出每日电耗 N_2 。若 $N_2 < N_1$,则把时间间隔改为 $t_3 = t_2 - 0.5t_1$ 重新进行实验。直到

$|N_n - N_{n+1}| \leq 0.05$ 度, 即被认为已逼近 N_{min} 值。其对应的 t_n 就是所求的节能除霜时间间隔值。

4.2 特性参数数值寻优结果

最佳节能除霜时间间隔为 $t=9.5$ (h); 风机的电机电流特性参数值为 $I/I_0=1.125$; 风机转速特性参数值为 $n=1423$ (rpm); 冷风机进出风压差特性参数值为 $\Delta P/\Delta P_0=1.2$ 。

5 结 论

本文通过对冷风机各种特性参数的实验观察及理论分析, 认为以冷风机的进出风压差, 风机转速和风机的电机电流作为特性参数, 用以确定节能除霜的最佳始点, 都是可行的。但以风机的电机电流这一特性参数最为全面、准确地反映换热表面结霜的整体状态, 可靠性较高。而且因其使用仪器少、测量方法简单、可以实现全库自动巡回检测, 便于工业实用。只要保持电网电压的稳定, 就能有较高的精度。因此, 这是一种比较可行的冷风机除霜始点的优化控制方法。

本文还进一步研究了冷风机节能除霜的最佳工艺条件。分别用实验手段和理论计算方法找出节能除霜的最佳时间间隔, 及对应的进出风压差、电机转速、电机电流等特性参数值。特别是以电机电流特性参数值 1.125 为冷风机除霜优化控制始点, 对使用轴流风机、翅片式蒸发器的冷风机, 具有广泛的通用性。如果引入单片机控制技术, 即可以实现冷风机自动化节能除霜, 对保持冷风机高效率运行和节约能源, 都有重要意义。

本校制冷 1987 届郑国生、童军茂等同学参加了本课题的实验研究工作, 还得到王季襄教授, 张帆老师的帮助, 特此致谢。

参 考 文 献

- [1] 利绍松, 张之中, 1987. 制冷机组节能控制器. 制冷, (1): 45—47.
- [2] 吴大裕, 1979. 电机学(下册), 305—345. 水力电力出版社(京).
- [3] 张之中, 1986. 深圳水产冷库设计与引进设备介绍. 制冷, (3): 42—45.
- [4] 船舶设计实用手册冷藏通风编写组, 1975. 船舶设计手册(第六分册), 661—706. 国防工业出版社(京).
- [5] 湖北工业建筑设计院《冷藏库设计》编写组, 1980. 冷藏库设计, 226—301. 中国建筑工业出版社(京).
- [6] 小川和彦, 1992. 蒸发器への着霜现象解明とその対策. 冷冻, 67(779): 78—87.
- [7] 千葉孝男, 1983. 乾き空气、湿り空气および、水の热力学的诸性质(2). 冷冻空调技术, 34(395): 35—54.
- [8] 青木和夫、服部贤, 1990. 着霜をともなう热交换器. 冷冻, 65(758): 42—47.
- [9] 房安惠英, 1984. 送风機の仕様. 冷冻空调技术, 35(410): 5—9.

OPTIMAL CONTROL OF INITIAL DEFROSTING POINT IN AIR COOLER

Ge Mao-quan and Zhou Hong

(Department of Food Science and Technology, SFU, 200090)

ABSTRACT In this paper the temperature of vaporization caused by the sur-

face area of defrosting heat exchange, the wind pressure difference at inlet and outlet, and the electric current of motor as well as its rotating speed during the air cooler running were experimentally and theoretically studied. Besides, optimal control of the initial defrosting point in the air cooler and the technology for energy saving during defrosting were elucidated. The experimental results showed that the proper selection of controlled defrost method would significantly improve the technology of defrosting in the air cooler, expand the extent of automation in the refrigeration system and realize the energy saving during operation.

KEYWORDS air cooler, initial defrosting point, characteristic parameter, optimal control