

文章编号: 1006-2467(2004) 02-0316-05

# 风机盘管换热器动态换热模型及计算机仿真

姚 晔, 连之伟, 周湘江

(上海交通大学 制冷与低温工程研究所, 上海 200030)

**摘 要:** 在对盘管换热器复杂物理模型合理简化的基础上, 建立了相应的动态换热数学模型, 并求出了盘管换热器换热量与其各进口参数间的动态关系式. 以此为基础, 对风机盘管换热器的换热进行了动态仿真模拟, 得到了风机盘管换热器换热量随各进口参数扰动而发生变化的一般性规律.

**关键词:** 风机盘管; 换热器; 动态换热; 模型; 仿真

**中图分类号:** TK 172 **文献标识码:** A

## Dynamic Model and Simulation of Fan-Coil Heat Exchanger

YAO Ye, LIAN Zhi-wei, ZHOU Xiang-jiang

(Inst. of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200030, China)

**Abstract:** A dynamic heat exchange model of fan-coil heat exchanger was established based on the reasonably simplified physical model. The dynamic relation between the quantity of heat exchange and the imported parameters was obtained according to the model. Then, the dynamic heat exchange of a coil heat exchanger was simulated and some conclusions were drawn in terms of its regular laws of heat exchange.

**Key words:** fan-coil; heat exchanger; dynamic heat exchange; model; simulation

### 符号说明:

$a$ ——换热系数,  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$   
 $A$ ——空气通过盘管换热器的横截面积,  $m^2$   
 $c$ ——容积比热容,  $J/(m^3 \cdot ^\circ C)$   
 $d$ ——含湿量, 以 1 kg 干空气为基准,  $g/kg$   
 $F$ ——单位体积流体的换热面积,  $m^2/m^3$   
 $h$ ——焓,  $J/kg$   
 $K$ ——空气与盘管外表面的传质系数,  $kg/(m^2 \cdot s)$   
 $Q_0$ ——盘管换热量,  $W$   
 $t$ ——温度,  $^\circ C$   
 $u$ ——流体流速,  $m/s$   
 $\lambda$ ——空气与盘管外表面间的热传导系数,  $kg/(m^2 \cdot s)$   
 $\rho$ ——流体密度,  $kg/m^3$

$\tau$ ——单位时间,  $s$

### 下标

$a$ ——湿空气  
 $b$ ——盘管壁面  
 $bn$ ——冷冻水与盘管内表面之间  
 $bw$ ——空气流与盘管外表面之间  
 $g$ ——盘管换热器外表面饱和空气  
 $i$ ——进口  
 $m$ ——整个盘管  
 $o$ ——出口  
 $s$ ——初始值  
 $v$ ——盘管换热器壁面水蒸气  
 $w$ ——冷冻水

收稿日期: 2002-10-17

作者简介: 姚 晔 (1976-), 男, 湖南邵东县人, 博士生, 主要研究方向为空调系统仿真与优化控制. 连之伟 (联系人), 男, 教授, 博士生导师,

电话 (Tel.): 021-62933240; E-mail: yeyao10000@sohu.com.

风机盘管为用户提供的冷量或热量受到许多外界因素的干扰, 主要包括冷冻水的进水温度和流量、通过盘管换热器的空气流速以及空气状态参数. 研究这些干扰因素对风机盘管换热特性的影响, 不但有助于风机盘管空调系统的合理设计, 而且还有助于对该系统的能耗分析和节能控制管理. 本文以风机盘管的盘管换热器为对象, 建立其动态的换热模型, 通过计算机仿真研究盘管换热器的动态换热规律.

## 1 盘管换热器换热模型的建立

### 1.1 物理模型的描述

风机盘管机组的盘管换热器均采用铜管套铝片结构. 管外径 10~16 mm, 管壁厚 0.50~0.75 mm, 管根数 10~24 根, 管排列方式为叉排, 管中心距为 2~2.5 倍管外径, 管排数 2~3 排. 肋片为 0.15~0.20 mm 厚的铝板, 肋片间距 2.0~2.3 mm, 肋化系数 15~28. 通常, 流经盘管换热器空气的方向与冷冻水流动方向垂直且朝向相反, 如图 1 所示.

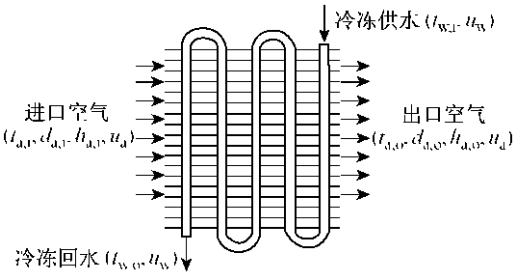


图 1 盘管换热器物理模型示意图

Fig.1 Schematic of the actual cooling coil

### 1.2 物理模型的简化及其数学模型

为了便于数学模型的建立和推导, 首先作如下几点必要的假设<sup>[1~4]</sup>:

- (1) 干空气和空气中的水蒸气都看成为理想气体, 并忽略流体密度与热容的变化.
- (2) 当盘管换热器外表面有冷凝水时, 形成均匀水膜并立即随重力流走, 不聚集在表面上, 而空气侧对流换热热阻包括铜管和肋片外表面冷凝水膜形成的额外热阻.
- (3) 湿空气与盘管换热器外表面的冷凝水膜之间的热质交换达到平衡, 则刘伊斯数  $Le$  为常数; 其值可进一步简化为 1.
- (4) 空气流均匀地通过盘管换热器, 空气与盘管换热器外表面的换热系数和传质系数在各处是一定的, 其值只随流体的流速变化.
- (5) 在空气温度变化幅度较小的情况下, 其对

- 应的空气饱和含湿量  $d_a$  与其温度  $t_a$  成线性关系.
- (6) 管内流体温度  $t_w$  只沿管长方向变化, 沿半径方向的温度分布是均匀的.
- (7) 当管排数大于 3 时, 交叉流换热器换热性能与全逆流换热器换热性能十分接近, 所以, 当盘管换热器对湿空气进行降温除湿处理过程当中, 可将空气和水流动的交叉方式近似按照全逆流方式进行处理.
- (8) 如图 2 所示, 对于微元体  $dx$  而言, 盘管换热器盘管内壁面和外表面以及通过该微元体流体的参数简化为集中参数.

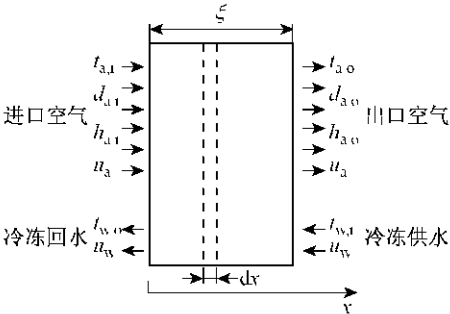


图 2 盘管换热器简化物理模型图

Fig.2 Schematic of the counterflow cooling coil

- (9) 令盘管换热器盘管长度为  $l$ , 盘管换热器沿空气流向的尺寸为  $\xi$ , 当冷冻水在盘管中的流速为  $u_w$  时, 冷冻水沿  $x$  轴方向的当量流速为

$$u_w' = u_w \xi / l = u_w \Psi$$

为了使盘管换热器进、出口参数之间的动态关系更直观, 将这些进、出口参数都看成是一种进、出口信号, 将进口参数的瞬时变化量视作某一种信号的干扰量, 而出口各参数的变化是由这些干扰量引起的反应. 每个出口参数的变化量都是所有进口参数变化量的函数, 它们之间存在着某种耦合关系. 盘管换热器进、出口信号理论耦合图如图 3 所示, 其中,  $r$  为传递系数,  $\Delta$  为各参数的变化量.

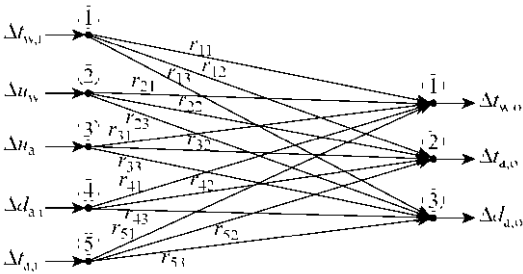


图 3 盘管换热器进、出口信号理论耦合图

Fig.3 Dynamic coupling relationship between

the imported and exported parameter of

a cooling coil

这样, 盘管换热器进、出口参数之间的动态关系可表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta t_{w,o} \\ \Delta t_{a,o} \\ \Delta d_{a,o} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} & r_{41} & r_{51} \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} & r_{42} & r_{52} \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} & r_{43} & r_{53} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta t_{w,i} \\ \Delta u_w \\ \Delta u_a \\ \Delta d_{a,i} \\ \Delta t_{a,i} \end{bmatrix} \quad (1)$$

可以通过建立盘管换热器数学模型的方法, 求出其传递系数的表达式, 确定  $r_{ij}$ , 进而确定进、出口参数间定量的动态耦合关系. 根据上述模型对微元体  $dx$  建立盘管换热器动态换热数学方程式:

冷冻水热平衡方程

$$c_w \frac{\partial t_w}{\partial \tau} - c_w u_w \frac{\partial t_w}{\partial x} = a_{bn} F_w (t_b - t_w) \quad (2)$$

盘管换热器盘管壁面热平衡方程

$$c_m \frac{\partial t_b}{\partial \tau} = a_{bn} F_w (t_w - t_b) + a_{bw} F_a (t_a - t_b) \quad (3)$$

空气侧湿度平衡方程

$$\rho_a \frac{\partial d_a}{\partial \tau} + \rho_a u_a \frac{\partial d_a}{\partial x} = K F_a (d_g - d_a) \quad (4)$$

空气热平衡方程

$$\rho_a \frac{\partial h_a}{\partial \tau} + \rho_a u_a \frac{\partial h_a}{\partial x} = \lambda F_a (h_v - h_a) \quad (5)$$

盘管换热器瞬时换热量

$$Q_o = \rho_a u_a A (h_{a,i} - h_{a,o}) \quad (6)$$

### 1.3 方程的求解

式(2)~(5)都是一阶非线性偏微分方程, 将它们线性化处理后, 再经过拉普拉斯变换, 变为代数方程. 代数方程中的输出量与输入量之比, 就是传递函数. 这样, 就可将传递函数视为  $S$  (频域) 中的算子, 避免了复杂的时域微分方程的求解<sup>[5]</sup>.

对非线性方程作线性化处理, 就是将各个变量均写成初始值  $\theta$  和增量  $\Delta\theta$  的和, 并代入系统方程, 使系统成为线性增量方程, 只要将干扰限制在较小的范围内, 线性处理仍然有足够的精度<sup>[6]</sup>.

由前面假设, 方程中的传热或传质系数  $a_{bn}$ 、 $a_{bw}$ 、 $K$ 、 $\lambda$  仅仅是介质流速的函数, 则有

$$\left. \begin{aligned} a_{bn} &= a_{bn,s} + \left\{ \frac{\partial a_{bn}}{\partial u_w} \right\}_s \Delta u_w \\ a_{bw} &= a_{bw,s} + \left\{ \frac{\partial a_{bw}}{\partial u_a} \right\}_s \Delta u_a \\ K &= K_s + \left\{ \frac{\partial K}{\partial u_a} \right\}_s \Delta u_a \\ \lambda &= \lambda_s + \left\{ \frac{\partial \lambda}{\partial u_a} \right\}_s \Delta u_a \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

按式(7)的要求, 分别将式(2)~(6)变换成线性常系

数方程, 然后利用拉普拉斯变换, 传递函数法求解, 求解步骤详见文献[6], 这样, 可得换热量  $\Delta Q_o(S)$  与各进口参数之间的动态关系式:

$$\Delta Q_o(S) = R_1(S) \Delta t_w(\xi, S) + R_2(S) \Delta u_w(\xi, S) + R_3(S) \Delta u_a(0, S) + R_4(S) \Delta d_a(0, S) + R_5(S) \Delta t_a(0, S) \quad (8)$$

式中,  $R_1(S) \sim R_5(S)$  为对应干扰量的传递函数, 与盘管换热器的结构参数和运行初始条件有关. 限于篇幅, 不一一列出.

### 1.4 换热模型的实验验证

为了便于验证上述模型的有效性, 以某厂 FP-5 型风机盘管的盘管换热器为例, 在一定初始条件下 (按表 1 中的初始条件 A) 对其换热特性进行动态模拟, 并由实验进行验证. 为了保证实验的精度, 由计算机采集和处理实验数据. 实验值与模拟计算值的比较如图 4、5 所示. 可见, 由上述模型计算得到的盘管换热器动态换热的模拟计算值和实验值基本吻合. 说明本文的盘管换热器动态换热模型可用于模拟其实际的动态换热特性.

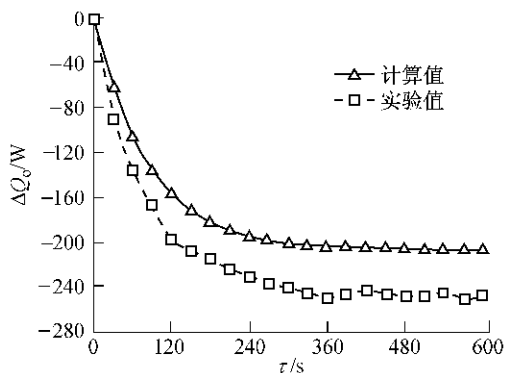


图4 冷水进口温度增加 1℃ 后换热量的变化

Fig.4 Variation of heat exchange after the inlet cooling water temperature increases by 1℃

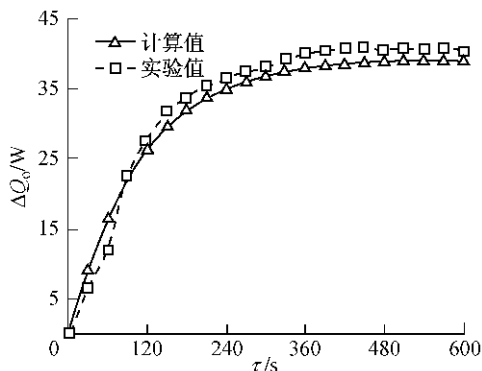


图5 冷水流速增加 0.5 m/s 后换热量的变化

Fig.5 Variation of heat exchange after the cooling

表 1 初始运行条件  
Tab. 1 Initial running conditions

|   | $t_{w,i}/\text{ }^{\circ}\text{C}$ | $u_w/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | $u_d/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ |
|---|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| A | 7.0                                | 1.2                                | 1.8                                |
| B | 7.0                                | 1.6                                | 1.8                                |
| C | 7.0                                | 2.0                                | 1.8                                |
| D | 7.0                                | 1.2                                | 2.4                                |
| E | 7.0                                | 1.2                                | 3.0                                |
| F | 9.0                                | 1.2                                | 1.8                                |

注:  $(t_w-t_b)_s$  均为  $5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $(t_a-t_g)_s$  均为  $10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$   
 $(d_a-d_g)_s$  均为  $5.0\text{ g/kg}$ ;  $(h_a-h_g)_s$  均为  $18.0\text{ g/kg}$   
 $t_a$  均为  $28.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $d_{a,i}$  均为  $16.0\text{ g/kg}$

2 动态换热的计算机仿真

在表 1 所示的几种不同初始条件下, 分别给盘管换热器各进口参数施加一个正的阶跃扰动, 其换热量的变化曲线如图 6~9 所示。

由图 6 可见, 在不同的初始条件下, 相同的冷水进口温度扰动对盘管换热器换热量的影响是不同的。比较初始条件 A、B、C 下的换热量变化曲线知,

随着冷水流速的增大, 冷水进口温度扰动对盘管换热器换热量的影响将增大; 比较初始条件 A、D、E 下的换热量变化曲线知, 随着空气流速的增大, 冷水进口温度扰动对盘管换热器换热量的影响也将增大; 比较初始条件 A、F 下的换热量变化曲线知, 随着冷水进口温度的增大, 盘管换热器换热量将会下降得更快。

由图 7 可见, 随着冷水流速的增大, 盘管换热器换热量增加的速度将减慢; 通过盘管换热器的空气流速越大, 冷水流速扰动对换热量的影响越大; 冷水进口温度升高, 冷水流速扰动对换热量的影响减弱。

由图 8 可见, 进风温度扰动对盘管换热器冷量的影响将随空气流速的增大而增大, 随冷水流速的增大而减小; 当冷水进口温度上升时, 该扰动对盘管换热器换热量的影响将减弱。

由图 9 可见, 盘管换热器的空气流速增大, 其换热量增加的速度将减慢; 随着盘管换热器冷水流速的增大, 其换热量受进风空气流速扰量的影响将减小; 进水温度升高, 空气流速扰动对盘管换热器换热量的影响减弱。

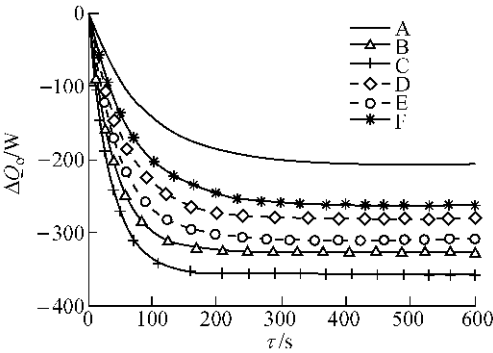


图 6 冷水进口温度增加 1 °C 后换热量的变化  
Fig. 6 Variation of heat exchange after the inlet cooling water temperature increases by 1 °C

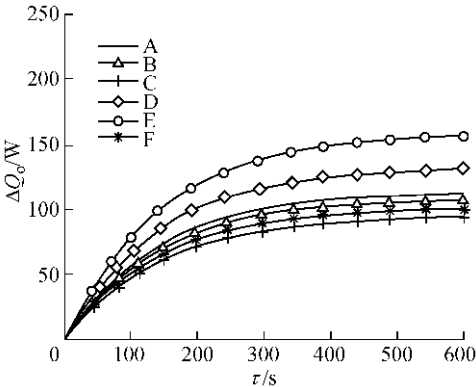


图 8 进口空气温度增加 1 °C 后换热量的变化  
Fig. 8 Variation of heat exchange after the inlet air temperature increases by 1 °C

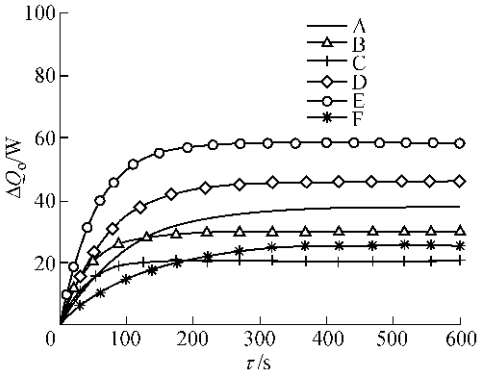


图 7 冷水流速增加 0.5 m/s 后换热量的变化  
Fig. 7 Variation of heat exchange after the cooling water flow rate increases by 0.5 m/s

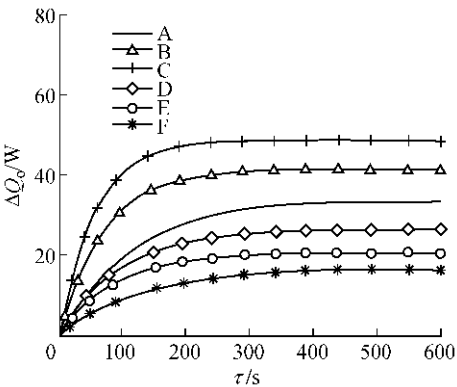


图 9 空气流速增加 0.5 m/s 后换热量的变化  
Fig. 9 Variation of heat exchange after the air flow rate increases by 0.5 m/s

3 结 论

- (1) 冷冻水进口温度扰量对盘管换热器换热量的影响, 随冷冻水或空气流速增加而增大; 随冷冻水进口温度增大, 盘管换热器换热量下降速度加快.
- (2) 冷冻水流速扰量对盘管换热量换热量的影响, 将随冷冻水流速的增加而增大, 随冷冻水进口温度的升高而减弱; 随着冷水流速的增大, 盘管换热器换热量增加的速度将减慢.
- (3) 空气流速扰量对盘管换热器换热量的影响, 随冷冻水流速增大或进口温度升高而减弱; 随空气流速的增大, 盘管换热器换热量增加速度减慢.
- (4) 进风温度扰量对盘管换热器冷量的影响将随空气流速的增大而增大, 随冷水流速的增大而减小; 当冷水进口温度上升时, 该扰量对盘管换热器冷量的影响将减弱.

参考文献:

[ 1] 杨强生. 对流传热与传质[ M ]. 北京: 高等教育出版社,

1985. 216– 253.

[2] Khan A Y. Heat and mass transfer performance analysis of cooling coils at part-load operating conditions [ J ]. **ASHRAE Transactions**, 1994, 100( 1 ): 54– 61.

[3] Hill J M, Jeter S M. A linear subgrid cooling and dehumidification coil model with emphasis on mass transfer[ J ]. **ASHRAE Transactions**, 1991, 97( 2 ): 118 – 128.

[4] Senshu T, Hatada T, Isbibane K. Heat and mass transfer performance of air coolers under wet conditions [ J ]. **ASHRAE Transactions**, 1981, 87( 1 ): 109– 115.

[5] 张春路, 丁国良. 电冰箱动态负荷传递函数模型[ J ]. 上海交通大学学报, 2002, 36( 2 ): 188– 192.

ZHANG Chun-lu, DING Guo-liang. Transfer function model of dynamic thermal loads in household freezer/refrigerator[ J ]. **Journal of Shanghai Jiaotong University**, 2002, 36( 2 ): 188– 192.

[6] 陈芝久, 阙雄才, 丁国良. 制冷系统热动力学[ M ]. 北京: 机械工业出版社, 1998. 40– 45.

简讯

学报 2003 年第 6 ~ 第 8 期 EI 检索论文通报

2003 年第 6 期:  
第一作者( 页码)

|            |           |
|------------|-----------|
| 崔小准( 0805) | 金 毅(0901) |
| 左健存( 0812) | 曹大军(0910) |
| 张爱萍( 0816) | 孙 鹏(0915) |
| 龚向阳( 0820) | 郑明磊(0918) |
| 王兴东( 0824) | 任正云(0922) |
| 张 伟( 0832) | 张浩然(0927) |
| 代文亮( 0836) | 宋庆文(0931) |
| 张嘉俊( 0839) | 蔡云泽(0935) |
| 孙丽萍( 0843) | 胡世余(0939) |
| 许健华( 0846) | 朱芳来(0943) |
| 吉建华( 0854) | 冯元骥(0947) |
| 徐志扬( 0866) | 沈晓晶(0951) |
| 刘功申( 0878) | 欧阳晋(0956) |
| 张敬谊( 0882) | 欧阳晋(0961) |
| 李傲雷( 0892) | 何黎明(0964) |
| 屈 刚( 0897) |           |

2003 年第 7 期:  
第一作者( 页码)

|            |
|------------|
| 黄文波( 0969) |
| 黄文波( 0973) |
| 纪亨腾( 0977) |
| 江华涛( 0981) |
| 江华涛( 0985) |
| 刘建成( 0990) |
| 袁 远( 0995) |
| 夏利娟( 0999) |
| 董大栓( 1002) |
| 郑海明( 1010) |
| 陈子侠( 1013) |
| 刘振华( 1018) |
| 王丽伟( 1023) |
| 于 娟( 1027) |
| 王玉璋( 1031) |
| 黄兴华( 1035) |
| 谷 波( 1040) |
| 王 东( 1045) |

|            |
|------------|
| 杨洪波( 1049) |
| 张鸿冰( 1053) |
| 隋 征( 1057) |
| 魏红芹( 1061) |
| 贾建军( 1064) |
| 潘 伟( 1068) |
| 周 飞( 1072) |
| 罗中华( 1077) |
| 王 辉( 1081) |
| 程先华( 1086) |
| 伏 龙( 1090) |
| 黄冬平( 1094) |
| 刘军朴( 1098) |
| 张 洁( 1102) |
| 邹 剑( 1106) |
| 杨煜普( 1110) |
| 李典庆( 1114) |

2003 年第 8 期:  
第一作者( 页码)

|            |            |
|------------|------------|
| 李典庆( 1141) | 邹春平( 1213) |
| 李典庆( 1146) | 许劲松( 1219) |
| 黄文波( 1151) | 顾敏童( 1222) |
| 黄文波( 1155) | 史一鸣( 1226) |
| 余 澜( 1159) | 杨晨俊( 1229) |
| 朱仁传( 1164) | 钟宏才( 1234) |
| 赵 隽( 1168) | 桑 松( 1238) |
| 孙 辉( 1172) | 蒋如宏( 1242) |
| 顾永宁( 1176) | 乐美龙( 1246) |
| 龙云祥( 1181) | 黄 河( 1251) |
| 张新曙( 1186) | 李明齐( 1282) |
| 于利磊( 1189) | 傅红燕( 1288) |
| 于利磊( 1193) | 陈 立( 1293) |
| 曹梅亮( 1198) | 林梦冬( 1297) |
| 刘见华( 1201) | 陈 川( 1303) |
| 刘见华( 1205) | 刘军清( 1308) |
| 杨德庆( 1209) |            |