

文章编号: 1671-6612 (2021) 04-532-05

复合式地板辐射供暖系统控制方法研究

欧阳思钰 雷 波

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘 要】 以川藏线某铁路客运站地板辐射加全空气系统的复合供暖空调方式为对象, 研究节能控制方法。通过建立复合式地板辐射供暖的仿真模型, 分析得出了地板辐射 100% 优先供暖为最节能的控制策略; 在地板辐射优先供暖控制策略的基础上, 采用神经网络与模糊控制相结合的控制算法, 仿真结果表明室内作用温度的控制效果更好, 系统的流量变化更加平稳, 能耗降低了 17.9%, 优于传统的 PID 控制。

【关键词】 复合式地板辐射供暖; 神经模糊控制; 控制策略; 控制算法
中图分类号 TU833/TU832 文献标识码 A

Control Methods Research of Hybrid Radiant Floor Heating System

Ouyang Siyu Lei Bo

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 In this paper, the control method of saving energy is studied based on the hybrid heating form of using radiant floor and air system in a railway passenger station on Sichuan-Tibet line. By establishing the simulation model of hybrid radiant floor heating system, it is concluded that the radiant floor 100% priority heating is the most energy saving control strategy. Based on this control strategy, the control algorithm combining neural network and fuzzy control is adopted. The result show that the control effect of indoor operative temperature is better, the flow change of system is more stable, and the energy consumption is reduced by 17.9%, which is better than the traditional PID control.

【Keywords】 Hybrid radiant floor heating system; Neural fuzzy control; Control strategy; Control algorithm

作者简介: 欧阳思钰 (1997-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 547861874@qq.com

通讯作者: 雷 波 (1961-), 男, 博士, 教授, E-mail: lbswjtu@163.com

收稿日期: 2021-06-22

0 引言

川藏铁路客运站由于其所在地区的特殊气候条件, 空调系统只需冬季供暖, 目前工程设计主要采用低温地板辐射供暖+全空气系统辅助供暖的复合式空调方式。由于在铁路客运站的总能耗中, 空调/供暖能耗占到了 60%~80%, 因此空调系统节能研究很有必要, 其中运行节能是一项重要的节能措施。

有关地板辐射供暖技术已有很多的研究, 例如, Chen Zhang、H Yoshino、O Bozkir 等人^[1-3]指出地板辐射供暖的垂直空气温度差较低, 温度分布好,

相比于对流采暖方式其在热舒适性方面有着明显优势; T Y Chen^[4]针对地板辐射供暖系统热滞后性大的问题, 研究了自适应预测控制。而在复合式系统方面, 喻李葵^[5]研究了铁路客运站候车厅的冬季供暖系统, 指出复合式地板辐射供暖系统对比分层空调能得到更为均匀的温度场分布, 并且供暖能耗可降低 20%左右; 王康^[6]研究了火车站候车大厅夏季与冬季的地板辐射复合式系统, 其中全空气系统在冬季只承担湿负荷; 王胜男^[7]针对复合式地板辐射系统的全年工况, 研究了遗传算法优化下的 BP 神经网络控制。目前, 很少有针对复合式地板辐射

系统供暖工况控制方法的研究。

在目前大多数铁路客运站的空调系统实际运行中,基本上采用传统的反馈控制,智能化程度不高。而在已有的研究中,神经网络预测控制过于依赖数据的准确性与数量,自适应预测控制需要建立准确的模型,因此要应用到铁路客运站这种大空间建筑中较为困难。本文以川藏线某铁路客运站为对象,研究确定复合式地板辐射供暖系统的控制策略,提出神经网络结合模糊控制(神经·模糊控制)的预测控制算法,对系统运行效果进行仿真分析,并与 PID 控制的效果进行对比。

1 车站建筑与空调系统

该建筑为川藏线上某座铁路客运站,共两层,总面积为 14970m²。为了方便分析,取车站的首层作为研究对象,其他区域的模拟情况与该层相似。首层的建筑尺寸为 73m×45.3m×8.2m,地板辐射的面积为 72.6m×45.3m,北面与南面的窗墙比均为 0.475。喷口的设置高度为 5m。将此高大建筑 2m 以下区域划分为空调区,2m 以上区域划分为非空调区。

空调系统采用复合式地板辐射供暖系统,即低温地板辐射供暖+全空气系统辅助供暖。机组采用低温型 CO₂ 空气源热泵热水机组,地板辐射设计供水温度为 50℃,设计回水温度为 40℃,其中地板盘管采用 DN15 的聚乙烯管材,管间距为 200mm,铺设方式为回折型。全空气系统采用喷口定风量送风,新风与回风混合后,由空气处理机组处理至 30℃,送入室内。

辐射地板与人体之间的主要传热方式是辐射传热,对室内热环境的要求都是以作用温度为指标^[8],本文将以空调区的作用温度作为控制指标,作用温度设定为 18℃。

2 控制策略与控制算法

2.1 控制策略

在部分负荷时,供热量可以由地板辐射或者全空气系统提供,因此在确定控制方法时,首先需要分析确定两种供暖方式的优先控制策略。

本文通过 EnergyPlus 中的 Energy Management System (EMS) 模块对不同控制策略进行仿真。

为了确定复合式地板辐射供暖系统在连续运行工况下的最佳控制策略,选取三种特定的工况进行分析。工况 1: 喷口优先供暖,指的是首先开启喷口进行供暖,当喷口系统供热量达到最大时,再开启地板辐射进行供暖;工况 2: 辐射地板供暖能力 50%优先+喷口,指的是首先开启地板辐射进行供暖,当地板辐射的供热量达到最大供热量的 50%时,同时开启喷口系统进行供暖;工况 3: 地板辐射供暖能力 100%优先+喷口,指的是首先开启地板辐射进行供暖,当其供暖能力达到最大时,同时开启喷口系统。

表 1 三种优先工况

Table 1 Three preferred conditions

| 工况分类 | 控制策略 |
|------|--------------------|
| 工况 1 | 喷口优先供暖 |
| 工况 2 | 辐射地板供暖能力 50%优先+喷口 |
| 工况 3 | 辐射地板供暖能力 100%优先+喷口 |

通过模拟计算,得出了供暖季中三个完整月份 12 月、1 月、2 月,在三种工况下喷口与地板辐射的总供热量以及地板辐射的供热比例,如表 2 所示。

表 2 供热量分析

Table 2 Analysis of heating load

| 工况分类 | 供热量/GJ | 地板辐射供热比例/% |
|------|---------|------------|
| 工况 1 | 1897.45 | 69.31 |
| 工况 2 | 1886.64 | 70.14 |
| 工况 3 | 1779.48 | 79.41 |

由表 2 可知,工况 3 的供热量最少,为 1779.48GJ;工况 1、2 的供热量相差不大,分别为 1897.45GJ、1886.64GJ,工况 3 与工况 1 相比,供热量降低了 6.22%。工况 1、2、3 的地板辐射供热量分别占总供热量的比例为 69.31%、70.14%、79.41%。

通过以上结果分析可知,当地板辐射的供热比例较高时,在相同的空调区供暖要求的条件下,复合式地板辐射供暖系统的总供热量较低。这是因为喷口送风时,存在热空气上浮的现象,空调送风未能充分发展到人员活动区就已上浮到上部非空调区,造成了热量的浪费。而地板辐射供暖则是从地面处交换热量,其送出的热量会从低到高覆盖人员活动区,避免了喷口送风形式而造成的热量浪费。因此,地板辐射供热比例越高,热量浪费也就越少,

所需的总供热量就越低。

因此，在连续运行工况下采用辐射地板供暖能力 100% 优先的控制策略，可以最大程度地提高地板辐射供暖的比例，使复合式地板辐射供暖系统更加节能。

2.2 控制算法

使用 Matlab 平台建立神经·模糊控制算法模型。神经·模糊控制系统的基本结构如图 1 所示。该控制模型为三输入单输出，输入的变量为室外干球温度、太阳辐射强度^[9]、上一时刻地板辐射系统供水流量；输出变量为此时地板辐射系统供水流量。每个输入与输出分别划分为 5 个模糊区间（即每个参数有 5 个语言变量），通过 EnergyPlus 建立仿真模型来获得数据。

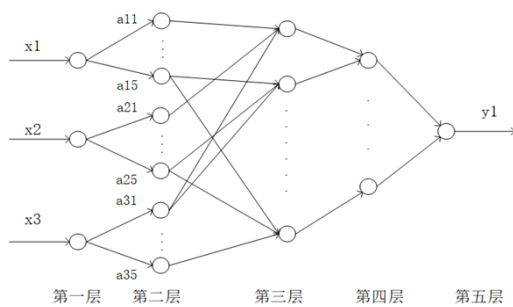


图 1 神经·模糊控制的基本结构图

Fig.1 The basic structure diagram of Neural fuzzy

表 3 网络各层输入、输出函数以及权值的形式

Table 3 The form of input, output functions and weights of each layer of network

| 层号 | 输入函数 | 输出函数 | 权值 |
|-----|---|--|---------------------------------|
| 第一层 | $f = u_i^1$ | $a = f$ | $w_i^1 = 1$ |
| 第二层 | $f = -\frac{(u_i^2 - m_{ij})^2}{\sigma_{ij}^2}$ | $a = e^f$ | $w_{ij}^2 = m_{ij}$ |
| 第三层 | $f = \min(u_1^3, u_2^3, \dots, u_p^3)$ | $a = f$ | $w_i^3 = 1$ |
| 第四层 | $f = \sum_{i=1}^p u_i^4$ | $a = \min(1, f)$ | $w_i^4 = 1$ |
| 第五层 | $f = \sum (m_{ij} \sigma_{ij}) u_i^5$ | $a = \frac{f}{\sum \sigma_{ij} u_i^5}$ | $w_{ij}^5 = m_{ij} \sigma_{ij}$ |

control

其中第一层为输入层；第二层的每个节点代表一个输入参数的语言变量值；第三层的每个节点代表一条模糊规则，它的作用是用来匹配模糊规则的前件；第四层的每个节点代表一个输出参数的语言变量值；第五层为输出层。各层的输入函数 f 、输出函数 a 以及权值如表 3 所示^[10]。其中 m_{ij} 、 σ_{ij} 为输入输出的隶属函数的中心与宽度，可由模糊 C 均值聚类算法得到；下标 i 表示不同的节点， j 表示不同的变量； u_i^l 表示不同网络层的节点输入。

输入参数根据表 3 中的输入输出函数，逐层地向前传递，到达第三层后，按照式 (1) 对网络权值进行监督学习，竞争得出模糊规则的结论。

$$w_{ij}(t) = o_j^4 (-w_{ij} + o_i^3) \tag{1}$$

向前传递一遍后，得到首次的输出，然后依据误差评价函数式 (2)，计算误差 E 。若误差 E 不满足要求，则使用误差反传算法 (BP 算法) 对隶属函数进行优化调整。以此循环，直至达到设定的误差 E 。

$$E = \frac{1}{2} (y(t) - \hat{y}(t))^2 \tag{2}$$

通过使用 EnergyPlus 建立的复合式地板辐射供暖系统模型，得到所需的输入、输出数据，选取其中 448 组典型数据作为训练集。对训练数据进行

归一化处理，并调整 BP 算法的学习速率，避免学习速率过大造成学习结果发散或学习速率过小造成学习程度低。选择 12 月 1 日的的数据作为验证集，

比较 EnergyPlus 模拟得到的理想流量与神经·模糊控制的预测流量, 如图 2 所示。

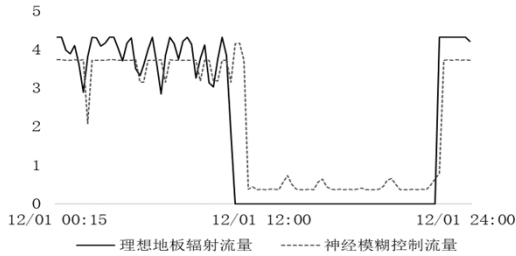


图 2 地板辐射流量对比图 (kg/s)

Fig.2 The contrast of radiant floor flow rate(kg/s)

可见, 神经·模糊控制系统的预测流量变化较为平缓, 其趋势与理想流量大致相同, 且差值不大, 故可用其进行系统流量控制, 并观察流量变化变得平缓之后的控制效果。

3 控制系统的仿真

3.1 仿真模型

使用 Trnsys 与 Matlab 建立复合式地板辐射供暖系统的神经·模糊控制仿真模型, 利用 Trnsys 内部的 Type155 模块将两者连接起来, 仿真模型如图 3 所示。

PID 仿真模型则使用 Trnsys 自带的 PID 控制模块来进行运行控制。两种方式仿真的时间步长均选择为 15min, 控制室内作用温度为 $18^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

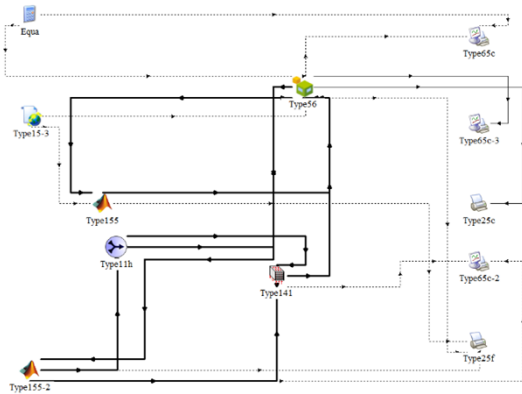


图 3 神经·模糊控制仿真系统图

Fig.3 Neural fuzzy control simulation system

3.2 仿真结果分析

从室内的作用温度控制情况、能耗以及运行过程对两种控制方式的仿真结果进行分析。

3.2.1 室内的作用温度情况分析

神经·模糊控制方式与 PID 控制方式 1 月 1 日

至 3 月 15 日的仿真结果如图 4、图 5 所示。

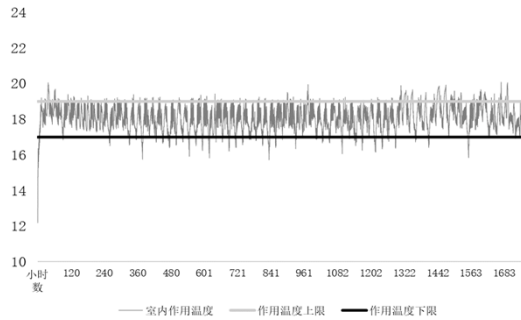


图 4 神经·模糊控制下室内作用温度变化情况 ($^{\circ}\text{C}$)

Fig.4 The indoor operative temperature variation of neural fuzzy control ($^{\circ}\text{C}$)

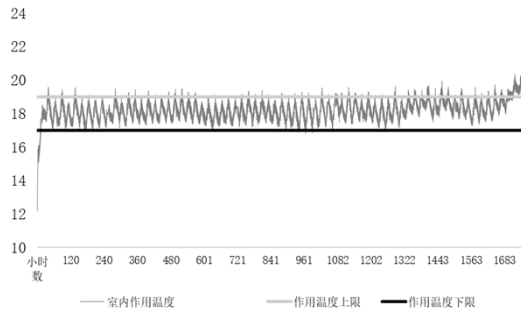


图 5 PID 控制下室内作用温度变化情况 ($^{\circ}\text{C}$)

Fig.5 The indoor operative temperature variation of PID control ($^{\circ}\text{C}$)

由图 4、图 5 可知, 两种控制方式的控制效果基本满足室内的控制要求。其中在神经·模糊控制方式下, 室内作用温度在区间 $[17, 19]$ 内的时间步占到了总时间步的 87.0%; PID 控制方式中, 室内作用温度在区间 $[17, 19]$ 内的时间步占总时间步的 90.4%, 两种控制方式在大多数情况下都能使室内的作用温度维持在要求范围内。

3.2.2 能耗分析

表 4 统计了整个供暖季中两种控制方式的能耗, 以及地板辐射与喷口系统的供热量。

表 4 两种控制方式供热量与能耗对比

Table 4 The comparison of heating supplied and energy consumption of two control modes

| 控制方式 | 供热方式 | 供热量/GJ | 辐射地板 供热占比 | 能耗/GJ |
|---------|------|---------|--------------|---------|
| PID 控制 | 地板辐射 | 1311.59 | 92.34% | 5363.67 |
| | 喷口系统 | 108.74 | | |
| 神经·模糊控制 | 地板辐射 | 1483.19 | 95.11% | 4403.47 |
| | 喷口系统 | 76.26 | | |

由表 4 分析可知, 神经·模糊控制方式相比于 PID 控制, 系统能耗减少了 17.9%。

3.2.3 运行过程分析

在系统的运行过程中, 流量变化情况是评价复合式地板辐射供暖系统的重要指标。流量变化不平稳, 将不利于机组的长期运行。选择某日数据分析两种控制方式的流量变化情况, 如图 6、图 7 所示。

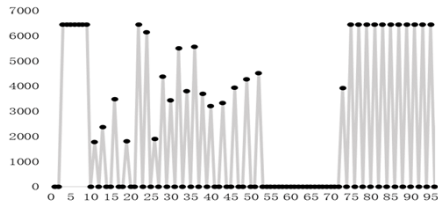


图 6 PID 控制下的地板辐射流量变化图 (kg/h)

Fig.6 The flow rate variation of radiant floor of PID control (kg/h)

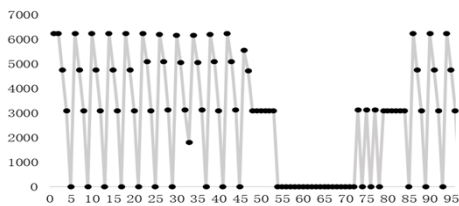


图 7 神经·模糊控制下的地板辐射流量变化图 (kg/h)

Fig.7 The flow rate variation of radiant floor of neural fuzzy control (kg/h)

由图 6 可以看到, PID 控制的流量变化并不平稳, 在仿真步进行到 75 步之后可以明显看到, 流量先是达到最大, 接着下一步流量为 0, 然后流量又达到最大。图 7 中, 神经·模糊控制下的流量变化则较为平稳, 不会突然从最大流量缩小为 0, 而是会有一到两个时间步来逐步减小流量。

3.2.4 仿真结果分析总结

两种控制方式对室内作用温度的控制效果都能满足要求。然而在 PID 控制中, 室内作用温度的波动情况呈明显的波浪形, 结合图 6 可知, 这种温度的波动是由于 PID 控制的流量变化不稳定引起的, 而这种不稳定则是由于 PID 控制属于反馈控制, 存在滞后性造成的。神经·模糊控制属于预测控制, 其能够解决地板辐射热滞后性大的问题, 对于复合式地板辐射供暖系统这种非线性系统, 其控制过程中的流量变化更为平稳, 耗能更低。

4 结论

本文针对复合式地板辐射供暖系统控制的运

行控制, 提出了控制策略与控制算法, 通过对川藏线某铁路客运站供暖系统的仿真分析, 得出以下结论:

(1) 对于地板辐射与全空气供暖相结合的复合式空调系统, 最节能的控制策略是地板辐射 100% 优先供暖;

(2) 本文提出的神经·模糊控制算法配合 100% 地板辐射供暖优先控制策略的控制方法, 相比于 PID 控制方法, 在满足室内温度要求的情况下, 系统的流量变化更平稳, 并且能耗降低了 17.9%。

参考文献:

- [1] Chen Zhang, P Michal. A review of integrated radiant heating/cooling with ventilation systems-Thermal comfort and indoor air quality[J]. Energy & Buildings, 2020,223(110094):1-18.
- [2] H Yoshino & S Guan. Indoor thermal environment of urban residential buildings in China: winter investigation in five major cities[J]. Energy and Buildings, 2004,36:1227-1233.
- [3] Oguz Bozkir, S Canbazoglu. Unsteady thermal performance analysis of a room with serial and parallel duct radiant floor heating system using hot airflow[J]. Energy and Buildings, 2004,36:579-586.
- [4] T Y Chen. Application of adaptive predictive control to a floor heating system with a large thermal lag[J]. Energy and Buildings, 2002,34:45-51.
- [5] 喻李葵, 余雷模. 铁路客运站候车厅冬季供暖系统优化分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015,45(5):1900-1908.
- [6] 王康, 徐玉党. 某火车站候车大厅热舒适性模拟研究[J]. 制冷与空调, 2012,26(5):484-488.
- [7] 王胜男. 铁路客运站复合式地板辐射系统设计与运行控制[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [8] Angela Simone, J Babiak. Operative temperature control of radiant surface heating and cooling systems[C]. Proceedings of Clima 2007 Wellbeing Indoors, 2007.
- [9] 滕润, 刘国丹. 冬季太阳辐射对平均辐射温度及 PMV 的影响研究[J]. 青岛理工大学学报, 2020,41(3):95-102.
- [10] Chin-Teng Lin. Neural-Network-Based Fuzzy logic control and decision system[J]. IEEE TRANSACTIONS ON COMPUTERS, 1991,40(12):1320-1336.