

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2016.02.006

夏热冬冷地区冷凝壁挂炉采暖冷凝率实验研究

杭鑫, 陈煜

(上海工程技术大学 机械工程学院, 上海 201620)

摘要:针对夏热冬冷典型地区以冷凝壁挂炉作为采暖热源, 冷凝效果存在着差异的现象, 设计了以低温地板辐射采暖为散热末端的冷凝壁挂炉实验系统; 设计了基于 PLC 和 Agilent 的数据监测和采集系统; 采集了供回水温度、室外温湿度、室内温度等实验数据, 理论计算和分析了冷凝壁挂炉的冷凝率。结果表明: 烟气温度随着供水温度的上升而升高, 冷凝壁挂炉的冷凝率逐渐降低。在当地采暖季典型的气候条件下, 当冷凝壁挂炉运行在供水温度约为 63 ℃ 时, 既能达到较高的冷凝率, 体现其高效、节能的优点, 也能达到室内舒适采暖效果的目的。

关键词:冷凝型壁挂炉; 冷凝率; 烟气温度; 数据采集

中图分类号: TU832.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-2895(2016)02-0025-05

Experimental Analysis of Condensation Rate of Condensing Boiler in Hot Summer and Cold Winter Zone

HANG Xin, CHEN Yu

(School of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: As a heating source in the typical area of hot summer and cold winter zone, there are some differences about the condensation effect of condensing wall-hung boiler. The experimental system was set up with the low-temperature radiant floor heating as the heating end. Based on PLC and Agilent, the data monitor and acquisition system was also designed to collect data about supply and returning water temperature, outdoor temperature and humidity, indoor temperature and so on. The condensation rate was calculated and analyzed theoretically. The result shows that flue gas temperature rises with the increase of water temperature, and the condensation rate decreases in a typical heating season. In the local climatic conditions of typical heating season, when the supply water temperature is about 63 ℃, the condensing wall-hung boiler can achieve a higher condensation rate, which reflects its high efficiency and energy saving, and it could achieve the purpose of more comfortable heating effect.

Key words: condensing wall-hung boiler; condensation rate; fume temperature; data collection

我国的夏热冬冷地区主要是指陇海线以南, 南岭以北, 四川盆地以东, 主要包括上海、江苏、浙江、安徽、湖北、湖南、重庆等省市^[1-4]。其气候特点是夏季酷热, 冬季湿冷。大部分地区最冷月平均气温在 0 ~ 5 ℃ 之间, 而非供暖房间室内温度也低于卫生学要求的 12 ℃^[5]。因此, 很多学者就针对夏热冬冷地区是否应该供暖的问题提出了自己的观点。上海是夏热冬冷的典型地区, 经济发达, 人们对生活质量要求较高, 因此近年来, 分散式的单户独立采暖为越来越多的普通百姓

所接受。根据上海地区典型住宅室内采暖设备使用现状调查显示, 无论是在市区、郊区还是农村, 空调供暖仍然是最普遍的采暖方式, 其次为电暖器, 而地板采暖和区域集中供暖的使用率呈现增长趋势^[6]。对于上海市是否实行集中供暖, 中国建筑节能协会专家委员会专家表示上海不适合集中供暖, 主要原因有建筑密度大, 消耗大量有限能源, 且上海缺乏暖气铺建基础等。新建小区可以考虑集中供暖, 但是大规模大范围供暖不现实; 而独立采暖, 具有温度随意调节、分户计

收稿日期: 2015-10-08; 修回日期: 2015-11-30

基金项目: 国家自然科学基金(51276130)项目资助; 上海工程技术大学“十二五”内涵建设项目(nhky-2012-05); 上海工程技术大学学科内涵建设与发展项目资助(14XKCZ12)。

作者简介: 杭鑫(1991), 男, 江苏扬州人, 硕士研究生, 主要研究方向为冷凝壁挂炉节能效率。E-mail: HTripleking@163.com

量、环保等优点,越来越适应人们生活的需要。目前上海天然气供应链已经相当完善,利用燃气壁挂炉结合地暖进行独立住宅式采暖已经成为大趋势。

普通燃气壁挂炉是以家庭住宅为单位,可以同时满足生活热水和采暖的需求,具有占用空间面积小,安全舒适,安装与操作方便灵活等优点,已经得到了较为顺利的推广和应用^[7-10]。随着壁挂炉技术的发展,在普通燃气壁挂炉基础上研发的冷凝型壁挂炉成为此行业的发展方向。冷凝壁挂炉除具有普通燃气壁挂炉的特点外,突出优点表现在烟气的余热回收,使壁挂炉的热效率有较大提高,因而锅炉烟气冷凝余热回收技术也是近年来锅炉节能技术的研究热点之一^[11-15]。

末端为低温地板辐射采暖的供暖系统,由于采暖所需水温较低的原因,更能与冷凝壁挂炉形成优势结合^[16]。本文针对上海市的某一完整采暖季,以低温地板辐射采暖作为采暖末端,对冷凝壁挂炉的运行特性进行了实验研究,分析其冷凝率的变化情况。从而为夏热冬冷地区,冷凝壁挂炉在实际运行过程中,如何提高其节能性这一问题提供依据。

1 实验采暖系统设计及其对应物理模型分析

1.1 采暖房间建筑条件与地暖系统的设计

实验采暖房间的室内空间大小为长 8.4 m,宽 4.0 m,面积共 33.6 m²,高 3.05 m,房间的建筑条件如下:

1) 外墙为现浇混凝土多孔砖墙,厚 240 mm,内面白灰粉刷,外抹水泥砂浆,传热系数为 1.97 W/(m²·K);内墙厚 240 mm,双面抹灰,传热系数为 2.11 W/(m²·K)。

2) 房间窗户选用单层铝合金平开玻璃窗,传热系数为 6.4 W/(m²·K)。

3) 房间外门为单层夹体木质,传热系数为 2.47 W/(m²·K)。

4) 房顶为挤塑聚苯乙烯 XPS 材料,传热系数为 0.8 W/(m²·K)。

根据该采暖房间的建筑条件,可以对其热负荷进行估算。而决定其热负荷的主要有围护结构修正耗热量、冷风渗透耗热量和冷风侵入耗热量^[17]。为此,对 3 种耗热量进行计算,计算结果如表 1 所示。

表 1 采暖房间热负荷计算

Table 1 Thermal load calculation of room

围护结构修正 耗热量 Q_1 /W	冷风渗透 耗热量 Q_2 /W	冷风侵入 耗热量 Q_3 /W	总的热负荷 $Q_{总}$ /W
3 109.57	175.24	0.00	3 284.81

根据上述表格中采暖房间的总耗热量,对其乘以

0.90~0.95 的修正系数进行修正,可以确定低温地板辐射采暖热负荷 Q 为 3 120.57 W。考虑到实验房间地面覆盖物和桌椅的影响,对上述计算得到的室内采暖热负荷 Q 进行覆盖率修正,修正系数为 1.25^[18],得到最终房间的采暖负荷 Q 为 3 900.71 W。那么,低温地板辐射采暖的单位面积的散热量 q_x 为 116.09 W/m²,地表面平均温度为 31.35 ℃。

以供水温度为 50 ℃,回水温度为 40 ℃作为低温地板辐射采暖的供回水温度,则平均水温为 45 ℃。根据实际情况,地暖设计以聚苯乙烯塑料板作为绝热层,混凝土进行填充,地板表面材料为陶瓷地砖;加热管采用导热系数为 0.38 W/(m²·K)的 PEX 管,选择地暖加热盘管平均间距 d 为 200 mm^[18]。

2 实验系统介绍

2.1 实验系统原理

实验系统原理如图 1 所示。图中,采暖水经天然气的燃烧加热,通过供水管道、分水器,进入地暖盘管,主要以辐射模式加热室内空气,经回水器及回水管道流至壁挂炉中进行再加热。

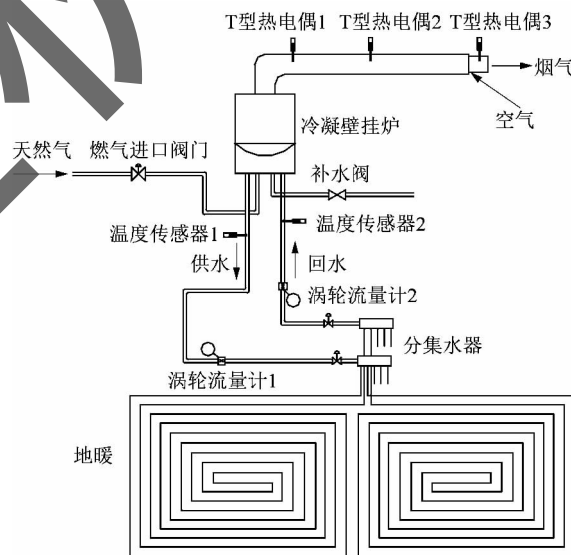


图 1 实验系统图

Figure 1 System diagram of experiment

供回水管道处均安装温度传感器和涡轮流量计,分别用来测量供回水的温度和流量。当系统运行时,温度传感器和涡轮流量计分别将温度信号和流量信号输送至 PLC,如图 2 所示。PLC 通过模拟量输入模块将这 2 种信号转换为与之成比例变化的数字量,由此测得供回水的温度和流量。同理可以通过温湿度传感器(图 3)获取相应温湿度数据。对于烟气温度和室内温度,则由 T 型热电偶进行测量。

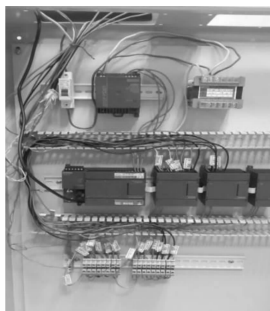


图2 PLC实物接线图

Figure 2 Connecting wire diagram of PLC



图3 温湿度传感器

Figure 3 Humidity and temperature sensor

实验以冷凝壁挂炉-低温地板采暖系统作为研究对象,在室外温度 $8 \sim 15^{\circ}\text{C}$,室外湿度为 $30\% \sim 70\%$ 区间范围气象条件下,不断提高供水温度,分析其在一个实验周期内,天然气使用量、冷凝水量以及室内平均温度的变化情况。

2.2 烟气测点布置

对基于冷凝壁挂炉的地板采暖系统,影响冷凝壁挂炉冷凝率的因素主要就是排烟温度,表征冷凝效果的主要参数为冷凝水的凝结量。围绕这两个关键参数进行实验设计,拟通过改变冷凝壁挂炉的供水温度来确定排烟温度与冷凝水量的变化规律。

测量选取的冷凝壁挂炉的供水温度分别为 $50, 55, 60, 63, 67, 71$ 和 75°C 。其中,对于烟气温度的测量,由于受制于实验室本身的空间布局,冷凝壁挂炉距离窗口较远,排烟管道较长,因而在排烟管道上设置3个烟气温度测点,具体测点布置如图4所示。

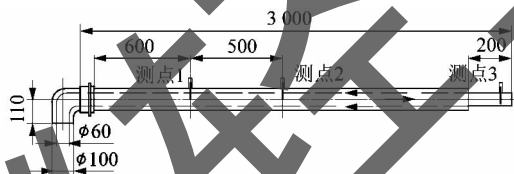


图4 排烟管道温度测点布置图

Figure 4 Fume temperature point diagram

实验中,3处烟气温度测点均采用T型热电偶,连接至安捷伦数据采集仪对温度信号进行测量。测量频率按照实验设定的每1min测量一次,获取在一个实验周期内的烟气温度数据。

3 夏热冬冷地区典型采暖季实验分析

3.1 烟气露点温度的确定

冷凝壁挂炉的烟气露点温度与燃烧的过剩空气系数有很大关系,取过量空气系数 α 为 1.15。根据过剩空气系数对天然气燃烧的烟气露点温度的影响曲

线^[19],可得对应的烟气露点温度 t' 为 55.375°C 。

3.2 天然气及冷凝水量变化趋势

由冷凝壁挂炉开启运行到实验结束,在一个实验周期内不断改变其供水温度,记录天然气用量以及搜集的冷凝水量,并对其进行统计整理,得到其随时间变化的关系曲线,如图5所示。

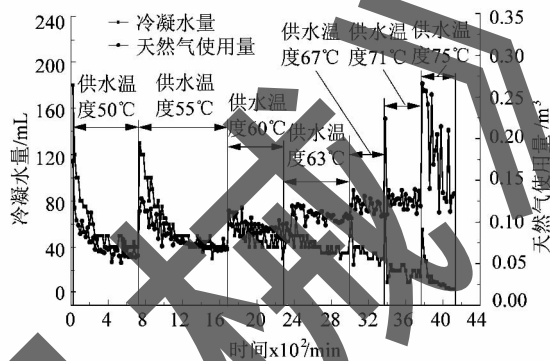


图5 燃气用量与冷凝水量变化趋势

Figure 5 Change of gas usage and condensate water

图5中各点分别表示其对应时刻前20min内的天然气使用量和冷凝水量的累积量。从图中的整体趋势可以看出,随着不断调高冷凝壁挂炉的供水温度,锅炉达到稳态时,单位时间内耗气量逐渐增多,当供水温度达到 75°C 时,天然气的使用量的波动性较大,这是因为在该时间段内,当室内温度达到壁挂炉的设定要求,有部分时间壁挂炉是处于待机状态。相反,冷凝水量随着不断调高的供水温度而逐渐减少,最后趋向于0。因为随着回水温度升高,烟气温度也相应升高,逐渐接近烟气露点温度,水蒸气不容易凝结,导致冷凝水量减少。

3.3 室内平均温度变化情况

在随着冷凝壁挂炉供水温度上升的同时,室内采暖平均温度随之上升,具体情况如图6所示。

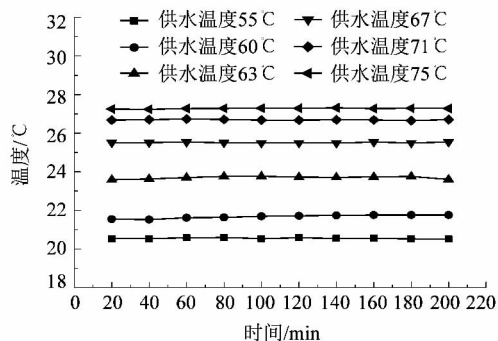


图6 室内平均温度分布情况

Figure 6 Temperature distribution of room

由图中可见,供水温度由 60 ℃ 提高到 63 ℃ 和由 63 ℃ 提高到 67 ℃ 这两个阶段,室内温度上升的幅度相对较大。结合人体自身因素与热环境综合评价指标 PMV 关系表^[20]可知,供水温度为 63 ℃ 时,室内空气温度更接近于 24 ℃,相比较于其他供水温度更能给人体带来舒适感。

3.4 冷凝率的计算

根据冷凝壁挂炉使用的天然气的燃烧特性,并按照过量空气系数 $\alpha = 1.15$ 来计算不同的室外温湿度条件时,1 m³ 的天然气燃烧能够产生的水蒸气量。回水温度越低,那么排烟温度越低,则与烟气露点温度差值越大,烟气中所包含的水蒸气越容易冷凝,回收的冷凝水量也就越多,即回收的热量越多。

在实际的运行工况中,冷凝壁挂炉的冷凝率计算公式如下:

$$\ln l = \frac{m_y}{m_q} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\ln l$ 为冷凝水的质量占原烟气中总的水蒸气质量的百分比; m_y 为由水蒸气冷凝下来的液态水的质量; m_q 为天然气燃烧产生的总的水蒸气的质量。

那么,在测量时,冷凝壁挂炉在不同排烟温度条件下,其冷凝率变化曲线如图 7 所示。

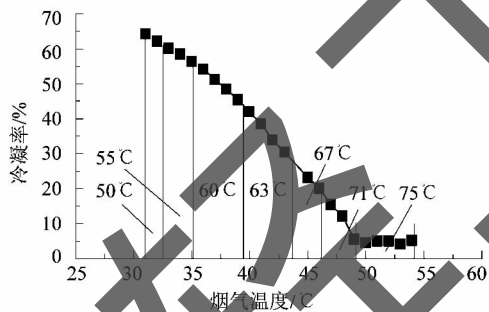


图 7 不同烟气温度下的冷凝率
Figure 7 Condensation rate in different fume temperature

由图中可知,在 30 ~ 50 ℃ 左右的烟气温度区间里,排烟温度与冷凝壁挂炉的冷凝率几乎呈一种线性的关系,每升高 1 ℃,冷凝率下降约 2% ~ 3%,这是因为随着烟气温度的逐渐升高,烟气的温度与露点温度差值减小,水蒸气较不容易冷凝下来。当烟气温度达到 50 ℃ 以后,壁挂炉的冷凝率在 4% 左右波动,此时冷凝壁挂炉几乎起不到节能的效果。

3.5 冷凝放热量计算

冷凝放热量主要是冷凝壁挂炉通过回收烟气中水蒸气的潜热部分,将水蒸气冷凝形成冷凝水而吸收的

冷凝热。根据搜集的凝结水量可以获得冷凝回收的潜热,烟气潜热回收量计算公式如下:

$$Q_{\text{潜}} = m_y r_y \quad (2)$$

式中: $Q_{\text{潜}}$ 为潜热换热量/kJ; m_y 为冷凝水质量/kg; r_y 为水的气化潜热/(kJ · kg⁻¹)。

根据公式(2)的计算结果,可以得到单位时间内锅炉回收的水蒸气的潜热量,其与烟气温度的关系曲线如图 8 所示。

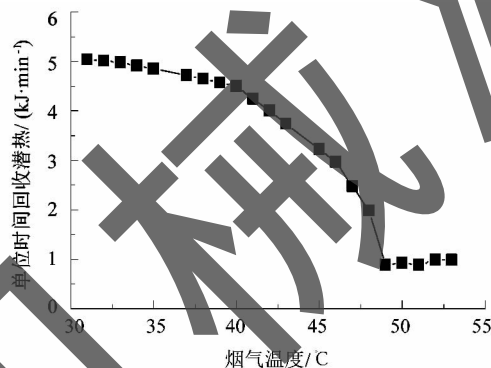


图 8 不同排烟温度燃烧 1 m³ 天然气的气化换热量
Figure 8 Heat transfer condensation quantity in different fume temperature

由图 8 可知,单位时间内回收的冷凝水潜热随着排烟温度的上升逐渐减小;排烟温度从 30 ℃ 上升到 40 ℃ 时,每上升 1 ℃,每分钟回收的潜热量则下降约 0.05 kJ 左右;当温度达到 48 ℃ 时,每分钟回收的潜热量最小,为 1 kJ 左右;温度继续上升,回收的潜热仍然保持在 1 kJ,说明此时通过水蒸气回收的潜热凝结的冷凝水量趋于稳定,无法更多地从烟气中回收潜热,冷凝壁挂炉的节能性下降。

4 结语

本文通过实验方法,在室外温度 8 ~ 15 ℃,室外湿度为 30% ~ 70% 的室外气象条件下,对冷凝壁挂炉-地暖系统中的天然气使用量、冷凝水量、排烟温度等参数进行测量,从而得出不同的供水温度条件下,冷凝率的变化情况。

冷凝壁挂炉的冷凝效率主要受排烟温度的影响。排烟温度越高,冷凝率越低,并逐渐趋向于 0;当供水温度达到 75 ℃ 时,则出现单位时间内天然气的使用量波动性较大的现象,这是由于实验房间的热负荷相对较小,系统回水温度短时间内达到锅炉设定的限值,导致壁挂炉处于待机状态,当回水温度低于限定值后,锅炉会再次启动运行,启动较为频繁。

在室外温度为 8 ℃ 左右,相对湿度约为 60%,冷

凝壁挂炉的供水温度为 63 ℃ 时,不仅体现出其高效节能的特点,而且房间采暖效果较好,给人带来较好的舒适感,为实际生活应用提供依据。但随着采暖房间结构的变化,该供水温度可能会发生变化,这还需要进行后续的探讨。

参考文献:

- [1] 吴敏莉. 夏热冬冷地区居住建筑墙体保温节能特性研究[D]. 杭州:浙江大学,2014:4-5.
- [2] 于学宏,江晨晖,张敏. 夏热冬冷地区公共建筑外窗幕墙的节能研究[J]. 建筑节能,2009,37(2):5-7.
- [3] 许磊. 夏热冬冷地区地源热泵技术的应用研究[D]. 南京:南京理工大学,2012:1-2.
- [4] 张东凯,郑洁,黄锋. 夏热冬冷地区供暖调研分析[J]. 暖通空调,2014,44(6):21-24.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范:GB 50736—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [6] 刘炜,黄晨,胡宇,等. 2011 年上海地区典型住宅室内采暖通风设备使用现状调查[C]//上海市制冷学会. 2013 年学术年会论文集. 上海:上海市制冷学会,2013:535-538.
- [7] 钱文斌,刘万勇,袁康,等. 燃气壁挂炉分户采暖的应用前景[J]. 煤气与热力,2005,25(11):39-40.
- [8] 吴明波,贾雁群,孙锦杰,等. 壁挂炉式燃气采暖炉分散供暖的技术经济分析[J]. 煤气与热力,2001,21(2):26-28.
- [9] 田贯三,郭非,耿克成. 天然气锅炉采暖方式的研究[J]. 煤气与热力,2004,24(4):189-193.
- [10] 金志刚,吴旭,洪庆华. 单户燃气采暖的应用[J]. 煤气与热力,2004,24(2):111-113.
- [11] CHE Defu, LIU Yanhua, GAO Chunyang. Evaluation of retrofitting a conventional natural gas fired boiler into a condensing boiler[J]. Energy conversion and management, 2004, 45(20):3251-3266.
- [12] JIA L, PENG X F, SUN J D, et al. An experimental study on vapor condensation of wet flue gas in a plastic heat exchange [J]. Heat transfer-asian research, 2001, 30(7):571-580.
- [13] 赵钦新,查爽,康子晋,等. 冷凝式锅炉及工程应用[J]. 工业锅炉,2003(4):1-9.
- [14] 赵凤香,杨可耕. 燃气锅炉燃烧及烟气冷凝回收原理[J]. 区域供热,2007(4):51-54.
- [15] 高东明,史晓军. 冷凝式空气加热器回收燃气锅炉排烟余热的分析[J]. 工业锅炉,2005(6):1-6.
- [16] 隋云亮,嵇永飞. 冷凝式壁挂炉与地板采暖系统的优势结合[J]. 中国建设信息供热制冷,2010(4):42-43.
- [17] 冉春雨. 供热工程[M]. 北京:化学工业出版社,2009.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 辐射供暖供冷技术规程:JGJ 142—2012[S]. 北京:中国建设工业出版社,2012.
- [19] 郭全. 燃气壁挂炉及其应用技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [20] 陈翠萍. 一种基于 PMV 指标的空调节能方法研究[D]. 上海:东华大学,2011:24-26.

(上接第 19 页)

- [3] MORI Y, NAKAYAMA W. Study of forced convective heat transfer in curved pipes: 2nd report, turbulent region[J]. International journal of heat and mass transfer, 1967, 10(1):37-59.
- [4] MORI Y, NAKAYAMA W. Study of forced convective heat transfer in curved pipes: 3rd report, theoretical analysis under the condition of uniform wall temperature and practical formulae [J]. International journal of heat and mass transfer, 1967, 10(5):681-695.
- [5] JAYAKUMAR J S, MAHAJANI S M, MANDAL J C, et al. Experimental and CFD estimation of heat transfer in helically coiled heat exchangers [J]. Chemical engineering research and design, 2008, 86(3):221-232.
- [6] JAYAKUMAR J S, MAHAJANI S M, MANDAL J C, et al. CFD

analysis of single-phase flows inside helically coiled tubes [J]. Computers and chemical engineering, 2010, 34(4):430-446.

- [7] DEAN W R, HURST J M. Note on the motion of fluid in a curved pipe[J]. Philosophical magazine, 1927, 4(2):208-223.
- [8] DEAN W R. The stream-line motion of fluid in a curved pipe[J]. Philosophical magazine, 1928, 5(30):673-695.
- [9] SCHMIDT E F. Wärmeübergang und druckverlust in rohrschlangen [J]. Chemie ingenieur technik, 1967, 39(13):781-789.
- [10] YOUNGLOVE B A, ELY J F. Thermophysical properties of fluids: II methane, ethane, propane, isobutane, and normal butane [J]. Journal of physical and chemical reference data, 1987, 16(4):577-798.

(上接第 24 页)

- [3] 丛明,温海营,刘同占,等. 基于生物力学结构的咀嚼机器人建模[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2011,39(2):13-17.
- [4] 雷孟冬. 六自由度咀嚼虚拟样机设计[D]. 成都:电子科技大学,2013:11-12.
- [5] YU Jinghu, PEI Gang, ZHANG Yinzh. Reverse kinematics of bionic 6-RSS chewing robot for food mechanical properties measuring [J]. Applied mechanics and materials, 2012, 127:3-11.
- [6] 李晓锋. 六自由度仿生咀嚼机器人研究[D]. 无锡:江南大学,

2014:17-52.

- [7] 张涛. 机器人引论[M]. 北京:机械工业出版社,2010:13-86.
- [8] 杨灏泉. 飞行模拟器六自由度运动系统及其液压伺服系统的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2002:8-36.
- [9] 夏群峰,彭勇刚. 基于视觉的机器人抓取系统应用研究综述[J]. 机电工程,2014,31(6):697-701.
- [10] 高洪,赵韩. 6-3-3 并联机构部分工作空间奇异性分析与仿真[J]. 系统仿真学报,2006,18(8):2370-2373.