

[综述·专论]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.04.021

低温空气源热泵研究进展

吴章炜, 李 瑛, 许治勇, 刘延博, 卢 欢

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘 要:为解决空气源热泵在低温环境下供热量不足、压比大和结霜严重等问题,许多学者进行了理论和实验研究,提出了外加辅助热源、优化压缩机性能和自动除霜等解决方案。笔者总结了部分学者在太阳能空气源热泵、两级压缩与单级中间补气以及除霜技术方面的研究成果,同时介绍了热声热泵技术在低温下提升系统性能,展望了无霜热泵技术在抑制结霜方面的应用前景,以期对低温空气源热泵的继续研究和推广提供参考。

关 键 词:低温空气源热泵;两级压缩;除霜技术;热声热泵技术;无霜热泵系统

中图分类号:TM925.1

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2017)04-0096-05

Research Progress of Low Temperature Air Source Heat Pump

WU Zhangwei, LI Ying, XU Zhiyong, LIU Yanbo, LU Huan

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to solve the problems of insufficient heat supply, large pressure ratio and severe frost in the low temperature environment. Many scholars carried out theoretical and experimental research, and proposed some solutions, such as auxiliary heat source, compressor performance optimization and automatic defrost. The author summarized some scholars' research results in the solar air source heat pump, two-stage compression with single stage compression system with intermediate vapor injection and defrosting technology, which could provide reference for further research and popularization of low temperature air source heat pump. At the same time the article introduced thermoacoustic heat pump technology to improve system performance in low temperature, and the application prospect of frost free heat pump technology in the frost suppression.

Keywords: low temperature air-source heat pump; two-stage compression; defrosting technology; thermoacoustic heat pump technology; frost-free heat pump system

随着环境保护越来越受重视,清洁能源成为大家关注的焦点。传统烧煤等供暖方式对环境污染较严重,北京等地区开展“煤改电”项目,采用更加洁净的电采暖方式。热泵供暖技术作为节能的供暖方式之一备受关注。空气源热泵相对于水源和地源热泵来说,前期资金投入少,无需打水井和埋管^{[1]39}。2015年住建部正式认可空气热能作为可在生能源之一。2016年环境保护部出台《民用煤燃烧污染综合治理技术指南(试行)》。正式将低温空气源热泵定义为:由电动机驱动的蒸气压缩制冷循环,以空气源为热(冷)源的热泵(热风/热水)机组,并能在不低于-20℃的环境

温度正常工作。并指出寒冷地区优先采用低温空气源热风热泵技术。在政策的支持下,空气源热泵受到市场的青睐。但空气源热泵在低温环境下使用时主要有以下几方面问题^{[1]39}:①制热量降低;②制热效率下降;③压缩机排气温度较高;④容易结霜等。众多学者针对以上问题展开广泛的研究,研究的热点主要集中在多热源热泵研究、压缩机性能优化与除霜技术等。

1 太阳能空气源热泵

由于热泵从室外吸取热量后传到室内,当室外温度较低时,不能获取满足需求的热量。为解决供热不足的问题,需要外加辅助热源。主要的方式有:电加

收稿日期:2016-12-21;修回日期:2017-03-25

第一作者简介:吴章炜(1991),男,福建福州人,硕士研究生,主要研究方向为低温空气源热泵技术。E-mail:wzw269560987@163.com

热、小型锅炉及太阳能等。电加热原理简单,安装方便,效果明显,但电耗高,能效比低;小型锅炉设备投资大,不利于环保,安装不方便;太阳能作为免费的可再生环保能源,具有作为辅助热源的天然优势,但受气候、区域等条件影响较大,具有间歇性。将太阳能集热器作为热泵的蒸发器,使两者的优势互补。

王新如等^[2-3]将空气源热泵系统改造为太阳能辅助的空气源热泵系统并进行对比实验。实验结果表明:带有太阳能辅助系统的性能系数(coefficient of performance, COP)和制热量约为常规空气源热泵系统的2倍;同时前者的冷凝器进出口温差比后者高19℃,这有利于提高室内温度。兰州理工大学卫涛敏^[4]依据兰州的气象条件对低温热泵进行模拟实验,结果表明:当室外温度为-20℃时,普通空气源热泵的COP较低,能耗几乎等同于电加热。当室外温度为0℃时,制取等量热水,太阳能辅助空气源热泵热水器分别比标准煤、电加热和单独空气源热泵热水器节能53.7%,82.1%和42.8%,从模拟的角度给出了太阳能辅助热泵在一定条件下更加节能的证明。清华大学李先庭等^[5]对太阳能热泵系统进行了改进:①将太阳能集热板与热泵蒸发器结合在一起。当太阳辐射较高时,采用集热板而关闭蒸发器风机,系统以太阳能集热方式运行;当无太阳辐射时,开启风机,变成普通热泵系统;当太阳辐射较低且环境温度较高时,蒸发器集热板与风机同时运行,变成太阳能热泵系统。②热量转移采用热管与热泵两种模式,当只有集热板单独工作时,采用热管进行导热,提高换热效率和减少电耗。

杨灵艳等^[6-7]为弥补太阳能的不稳定性,提出了一种将太阳能吸热板、相变蓄能材料和热泵蒸发器三者合在一起的方案。通过相变材料来储存太阳能和热泵在夜间利用低谷电价制取的热量,从而提升效率和节省电费。牛福新等^[8-9]提出一种通过三套管蓄能换热器将太阳能与空气源热泵结合在一起,成为三套管蓄能型太阳能空气源热泵,实验数据表明:供热模式的COP达3.00~3.75。吴薇等^[10]对太阳能热泵系统中不同的蓄能材料进行对比研究,实验结果表明石蜡在集热性能方面高于癸酸,但前者的体积膨胀率较大,对真空管的胀裂危害较大。许鸽等^[11]通过对空气源热泵、太阳能集热器和相变蓄能系统采用一体化控制达到节能的目的,工程实践表明这种控制方式能提高能效接近50%。

2 两级压缩与中间补气系统

空气源热泵技术运用于低温工况时,室外换热器

的蒸发压力低,导致单级压缩系统的压比大和排气温度高,严重影响了压缩机的稳定运行和性能。目前降低压缩机压比和排气温度的主要方法有两级压缩和单级压缩中间补气^[12]15]。普通空气源热泵在-15℃时难以正常工作且制热量低。两级压缩与中间补气技术能在-25℃下正常工作,适合北方寒冷地区使用^[13]。

两级压缩的原理是分2次将蒸发压力压到冷凝压力,从而降低每台压缩机的压比。蒸发压力通过低级压缩机压到中间压力,经过中间冷却后降低制冷剂温度,混合后的气体经过高级压缩机压到冷凝压力。图1所示为双级压缩热泵系统图。

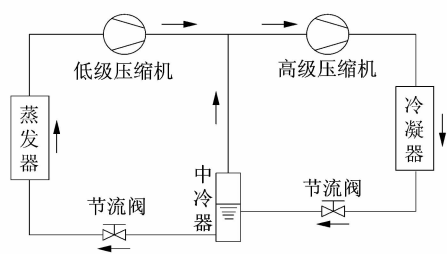


图1 带中间冷却器的双级热泵系统

Figure 1 Principle of two-stage heat pump system with intermediate cooler

单级中间补气系统又称为准二级压缩系统,通过中间补气口将一台压缩分为两级压缩。经过中冷器(或闪蒸器)后的低温气体经过补气口进入压缩机,降低排气温度,增加排气量,提升制热量。图2所示为单级压缩中间补气热泵系统图。

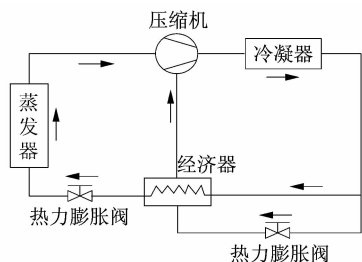


图2 带经济器的补气增焓热泵系统

Figure 2 Heat pump system with economizer of increasing enthalpy by supplying gas

中间冷却主要有中冷器和闪发器两种方式:中冷器作为一种换热器,其存在换热温差,使进入补气口的制冷剂温度较高,系统较易精确控制^[14];闪发器让进入补气口的制冷剂更接近饱和状态,没有换热温差的存在能更有效地降低排气温度,但系统不易精确控制。

对于中国大部分地区来说,室外超低温的天数较少,当室外温度较高时,两级压缩与中间补气系统的优

势就不太明显,单级热泵系统由于循环流程简单具有优势。何时进行运行模式的切换成为关注的焦点。刘桂兰^[15]对带闪发器的单级补气系统与单级压缩系统进行模拟计算,结果表明:当室外蒸发温度低于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,补气系统的COP与制热量高于单级压缩系统;当温度高于 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,采用单级压缩系统,因为此时补气系统的优势不明显,而且其电功率高于单级压缩系统,这是由于其它条件不变时,对于单级压缩系统,当蒸发压力降低时压缩机的吸气量会下降,从而减小压缩机的功率消耗,但对于补气系统而言,虽然其吸气量减少了,但其补气量增大了,从而导致压缩机实际电功率变化不大。郭宏^[12]^[19]对两级压缩、单级补气和普通空气源热泵进行对比实验,实验数据显示:两级压缩和单级补气技术能提升热泵在低温工况的制热量,且随着蒸发温度的降低其效果更明显。实验结果还表明:在一定的实验条件下,当室外温度高于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,单级补气系统的COP和制热量优于两级压缩系统,当室外温度低于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,两级压缩系统在制热量与COP方面高于单级补气系统。

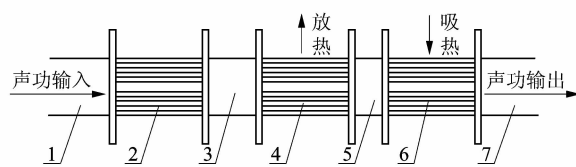
在低温环境下,压缩机中间补气系统能够提升系统的性能,为了定量研究补气量对热泵系统的影响,王文毅^[16]等对带经济器的补气系统进行实验研究,结果显示:随着压缩机补气量的增加,热泵系统的制热量和压缩机电功率不断上升,COP值出现先增大后减小,故存在一个COP最大时的最优补气量。可以通过加大补气量来提高制热量,但考虑经济性时则要控制补气量,当其补气量为总流量的10%~14%能获得最佳的能效比。

为使空气源热泵在更低的室外温度下正常运行和提升制热量,有学者^[17-18]提出准三级式空气源热泵系统,其原理是在两级压缩系统的基础上对低压级压缩机进行补气,提高低压级压缩机的排气量,降低其排气温度,进而提升热泵系统的性能。通过实验验证了准三级压缩热泵系统在低温工况下其制热性能优于两级压缩系统,尤其在超低温下优势更明显。

3 热声热泵技术

热声热泵是一种利用热声效应的新型技术,与传统蒸气压缩机相比,系统运动部件减少,性能可靠,使用寿命长,而且使用惰性气体及其混合物作为工质而不使用污染环境的制冷剂,还可以使用太阳能、燃气和电能等能源作为系统驱动^[19]。

中科院杨卓等^[20]提出了一种电驱动低温空气源双作用行波热声热泵系统,原理如图3所示。



1—连接管;2—一次低温换热器;3—热缓冲管;4—高温换热器;
5—回热器;6—主低温换热器;7—连接管。

图3 双作用行波热声热泵原理图

Figure 3 Schematic of traveling-wave thermo-acoustic heat pump

实验结果表明:当热源温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,热汇温度为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,热泵的制热系数达到3,相对卡诺系数为64%左右,泵热量能达到1600W,压比仅为1.19,系统具有很高的制热性能和经济性。杨卓^[21]又对该系统的回热器展开性能研究,以平行板叠、不锈钢丝网和纤维毡作为回热器的填充物进行对比研究,实验结果表明:对于相同丝径的回热器,平行板叠的系统获得的效率最高,丝网型和纤维毡型的系统获得的效率接近。赵阳等^[22]对回热器进行模拟计算得出回热器选择孔隙率高且丝径小的填充物有利于提高热泵性能;在长度适宜的条件下,换热器孔隙率对系统影响较小,而换热器内管束直径对系统影响较大。

热声热泵技术在低温条件下具有传统热泵无法比拟的优势,未来在微型装置、医疗冷藏和快速冷冻等方面具有广阔的应用前景,但由于制造工艺和设计水平未达到推广使用阶段,目前主要用于超低温工况和实验阶段,民用还需要改进工艺和降低制造成本。

4 除霜技术

空气源热泵系统在北方寒冷和南方潮湿地区使用都会存在室外换热器结霜的问题,导致制热量下降,从而影响室内温度。换热器结霜的理论和除霜技术成为当前研究的热点。空气源热泵除霜方式多样,主要有热气旁通、逆循环、相变蓄能和电热除霜等方式^[23]。电热除霜设备简单和易于控制,但其耗能大,不适宜推广。逆循环除霜是使用高温的压缩机排气来化霜,通过四通换向阀来控制,无需额外的设备,目前较常用。但逆循环除霜可能会影响室内温度,工况转换时对设备的冲击大。热气旁通类似于逆循环除霜,也是使用压缩机的高温排气,但它只是旁通了一部分蒸气用于除霜,系统无需停止制热,其对室内温度的影响较小,但除霜时间比较长。相变蓄能除霜是现在的研究热点,利用相变蓄热器储存余热,将余热用于除霜从而减少对室内温度的影响。

4.1 除霜理论

路伟鹏^[24]以普通和亲水铝箔换热材料为对象,研究其在融霜、排水和蒸干环节的差异性,并提出“翅片表面蒸干率”的概念。曲明璐等^[25]研究了融化水对多环路室外机除霜的影响,研究表明融化水会吸收部分热量造成能量的浪费。

热泵机组在除霜时容易对压缩机的稳定性造成影响,如导致液机。常采取的措施是设置气液分离器,但会导致降压。杜玉清^[26]提出通过管路或存储器储存制冷剂的方案。为考察换热器结霜与室外温度、湿度的关系,金宁等^[27]对两级压缩热泵进行结霜实验研究,结果显示:①0℃以下,随着温度的升高,结霜速度加快;②温度一定时,相对湿度越大,结霜越快,且相对湿度对结霜量的影响比温度大。这解释了南方湿度大的地区的结霜程度可能比北方的低温地区更严重。

针对换热器的空气流量对结霜的影响,有国外研究者^[28-29]得出不一致的结论。郭宪民^[30]认为造成结论不一致的原因是他们把换热器作为一个孤立的部件进行研究而没有考虑各个因素之间的相互影响。并通过研究不同的迎面风速对蒸发器结霜的影响得出:随着风速的降低,结霜的速率加快。这是由于迎面风速的减小使换热器的表面温度较低,有利于霜层的生长。

4.2 多联机除霜技术研究

多联机因其多台室内机共用一台压缩机,减少了设备的投资和运行费用等优点越来越受到消费者的认可^[31]。由于多联机的结构比分体式的复杂,两者在除霜上存在一定的差异。为此,有研究学者专门针对多联机的除霜展开研究。田浩等^[32]指出除霜时不同室内机的盘管温度可能不同,这与配管长度和室内机容量有关。为解决多联机除霜时对室内侧温度的影响,姜益强等^[33]使用相变除霜技术,通过电磁阀来控制除霜的过程,实验证明能节省30%左右的除霜时间。

4.3 无霜热泵

针对空气源热泵在低温和潮湿的条件下容易结霜的问题,近年来有研究学者提出一种无霜空气源热泵系统。王志华等^[34-35]利用固体干燥剂降低换热器表面的含湿量,从而避免结霜;通过回收冷凝热来再生干燥剂。实验表明:在室外环境为温度为0℃且相对湿度为80%时,其COP比热气旁通除霜系统和电除霜系统分别高7%和46%左右。

5 结 语

空气源热泵作为一种安装方便、高效节能的采暖设备,可以通过四通换向阀变成制冷工况用于夏季制

冷,做到一机两用,提高设备的使用率。虽然现有的热泵技术与设备能够满足部分北方地区的采暖需求,但在实际使用中存在如供热量不足、压缩机压比大和结霜等问题,这些都会影响用户体验和热泵的正常运行。

将太阳能与空气能结合的采暖方式符合当前节能、环保的主题。压缩机中间补气增焓是降低压比的常用方式之一,提高补气量的精确控制和压缩机的加工精度成为研究的重点。除霜是当前热泵系统难以避免的话题,结霜机理和除霜技术研究备受关注。无霜热泵系统避免了结霜和除霜对系统性能的影响,成为研究的热点。热声热泵技术用于超低温环境,国内研究较少,随着技术的成熟进而降低成本,热声热泵技术必将具有广阔的前景。

参考文献:

- [1] 蒋爽,杜伟,姜红晓. 低环境温度空气源热泵的设计及其在我国寒冷地区的应用[J]. 制冷与空调,2012,12(5):39-44.
- [2] 王新如,潘嵩,许传奇,等. 低温太阳能热水辅助空气源热泵系统的节能研究[J]. 制冷与空调,2015,15(10):16-19.
- [3] 胡月波,吴金顺,魏塋,等. 低温太阳能热水辅助空气源热泵系统制热系数实验分析[J]. 建设科技,2014(18):29-33.
- [4] 卫涛敏. 冬季寒冷条件下太阳能—空气源热泵热水器的数值模拟[D]. 兰州:兰州理工大学,2013:55-57.
- [5] 李先庭,吴伟. 高效低温热水系统的研究进展[J]. 科学通报,2015,60(18):1661-1677.
- [6] 杨灵艳,倪龙,姚杨,等. 三套管蓄能型太阳能和空气源热泵集成系统可行性实验[J]. 太阳能学报,2010,31(9):1168-1172.
- [7] 姚杨,杨灵艳. 三套管蓄能型太阳能与空气源热泵集成系统运行特性的实验研究[J]. 建筑科学,2010,26(10):251-254.
- [8] 牛福新,倪龙,姚杨,等. 三套管蓄能换热器的蓄热特性研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2011,38(7):69-72.
- [9] 牛福新,倪龙,姚杨,等. 三套管蓄能型热泵集成系统及其与冰蓄冷系统的比较[J]. 建筑科学,2011,27(2):71-73.
- [10] 吴薇,王玲珑,苏鹏飞,等. 不同蓄能材料的太阳能热泵系统性能对比[J]. 农业工程学报,2014,30(12):184-191.
- [11] 许鸽,刘学东. 太阳能集热器、空气能热泵及相变蓄能装置一体化控制的研究[J]. 淮海工学院学报(自然科学版),2013,22(4):9-12.
- [12] 郭宏. 两级压缩和单级补气式滚动转子压缩机应用于热泵系统的理论与实验研究[J]. 顺德职业技术学院学报,2015,13(3):15-19.
- [13] 巫华龙,高斌,虞阳波,等. 二级压缩热泵热水器特性的测试研究[J]. 家电科技,2016(7):42-45.
- [14] 李耀熙,何昌啟. 基于户用风冷冷水(热泵)机组的补气增焓系统实验研究[J]. 暖通空调,2015,45(7):102-105.
- [15] 刘桂兰,袁泉,梁平原. 闪发器热泵系统与单级压缩系统性能比较[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2012,35(4):447-451.
- [16] 王文毅,毛晓倩,胡斌,等. 中间补气量对经济器热泵系统性能的

- 影响[J]. 制冷学报, 2013, 34(4): 40-46.
- [17] 张岩松. 准三级压缩空气源热泵技术[J]. 科技资讯, 2014(31): 72-73.
- [18] 申江, 韩广健, 孙仲皓. 准三级蒸汽压缩式制冷系统与两级压缩制冷系统的比较[J]. 低温与超导, 2010, 38(2): 48-50.
- [19] 董凯军, 唐占超. 热声制冷新技术及其应用进展[J]. 家电科技, 2006(2): 13-15.
- [20] 杨卓, 罗二仓, 余国瑶, 等. 电驱动低温空气源双作用行波热声热泵[J]. 低温工程, 2012(4): 13-17.
- [21] 杨卓, 陈燕燕, 吴张华, 等. 超低温温行波热声热泵中的回热器研究[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(5): 808-811.
- [22] 赵阳, 陈燕燕, 罗二仓, 等. 直线电机驱动双作用行波热声热泵的理论及实验研究[J]. 制冷学报, 2014, 35(5): 7-13.
- [23] 王泮浩, 王志华, 郑煜鑫, 等. 低温环境下空气源热泵的研究现状及展望[J]. 制冷学报, 2013, 34(5): 47-54.
- [24] 路伟鹏, 王伟, 李林涛, 等. 不同表面浸润性对除霜过程影响的实验研究[J]. 制冷技术, 2014, 34(1): 26-31.
- [25] 曲明璐, 王坛, 陈剑波. 采用多环路室外机的空气源热泵除霜特性试验研究[J]. 流体机械, 2014, 42(11): 59-62.
- [26] 杜玉清, 左自豪. 空气源热泵机组除霜过程研究[J]. 制冷与空调, 2015, 15(9): 21-25.
- [27] 金宁, 李生飞, 张科, 等. 两级压缩空气源热泵结霜性能试验研究[J]. 制冷学报, 2010, 31(5): 38-43.
- [28] RITE R W, CRAWFORD R R. A parametric study of the factors governing the rate of frost accumulation on domestic refrigerator-freezer finned-tube evaporator coils [J]. ASHRAE transactions, 1991, 97(2): 438-446.
- [29] YAO Yang, JIANG Yiqiang, DENG Shiming, et al. A study on the performance of the airside heat exchanger under frosting in air source heat pump water heater/chiller unit[J]. International journal of heat and mass transfer, 2004, 47(17/18): 3745-3756.
- [30] 郭宪民, 王冬丽, 陈轶光, 等. 室外换热器迎面风速对空气源热泵结霜特性的影响[J]. 化工学报, 2012, 63(增刊2): 32-37.
- [31] 刘光磊, 明月. 多联机空调技术及其设计探讨[J]. 制冷, 2011, 30(3): 70-75.
- [32] 田浩, 董建锴, 姚杨, 等. 变频空气源热泵多联机常规除霜特性[J]. 暖通空调, 2014, 44(3): 34-37.
- [33] 姜益强, 田浩, 董建锴. 多联机空气源热泵相变蓄能除霜特性试验研究[J]. 制冷与空调, 2014, 14(8): 102-105.
- [34] 王志华, 王泮浩, 郑煜鑫, 等. 一种新型无霜空气源热泵热水器实验研究[J]. 制冷学报, 2015, 36(1): 52-58.
- [35] 郝鹏飞, 王泮浩, 王志华, 等. 蓄热除湿耦合型无霜空气源热泵热水器实验研究[J]. 制冷学报, 2015, 36(4): 85-91.

(上接第95页)

的得热量逐渐减小, 土壤温度增长速度、幅度都相应降低, 可见冷却塔的加入, 对充分发挥地下换热井的换热能力, 提高系统运行的效率和稳定性, 减缓土壤热堆积有着积极的作用。

参考文献:

- [1] 付融冰, 张慧明. 中国能源的现状[J]. 能源环境保护, 2005, 19(1): 8-12.
- [2] 中国工程院项目组. 中国能源中长期(2030、2050)发展战略研究: 可再生能源卷[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [3] 马宏权, 龙惟定. 地埋管地源热泵系统的热平衡[J]. 暖通空调, 2009, 39(1): 102-106.
- [4] 王景刚, 孙培杰, 王惠想, 等. 辅助冷却复合地源热泵系统可行性分析[J]. 河北建筑科技学院学报(自然科学版), 2005, 22(3): 8-11.
- [5] WANG Jinggang, GAO Xiaoxia, YIN Zhenjiang, et al. Study of operating control strategies for hybrid ground source heat pump system with supplemental cooling tower[C]//IITA International Conference on Services Science, Management and Engineering. Zhangjiajie, China: SSME, 2009: 507-510.
- [6] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993: 19.
- [7] 建设部建筑设计院. 民用建筑暖通空调设计技术措施[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993: 56-58.
- [8] 哈尔滨建筑工程学院. 供热工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985: 9-10.
- [9] 柴瑞娟, 陈海霞. 西门子 PLC 编程技术及工程应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 8-14.
- [10] 孙坤哲. 深入浅出西门子 WinCC V6[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.
- [11] 龙志文. 工控组态软件[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2005.