

硕 士 学 位 论 文

大体积混凝土超大规模无线温度监测系统研究

Research of Large-scale Wireless Temperature Monitoring System
for Mass Concrete

作 者 姓 名：_____ 申宇 _____

学 科、 专 业：_____ 结构工程 _____

学 号：_____ 21206124 _____

指 导 教 师：_____ 周智 _____

完 成 日 期：_____ 2015 年 5 月 1 日 _____

大连理工大学

Dalian University of Technology

大连理工大学学位论文独创性声明

作者郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用内容和致谢的地方外，本论文不包含其他个人或集体已经发表的研究成果，也不包含其他已申请学位或其他用途使用过的成果。与我一同工作的同志对本研究所做的贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

学位论文题目：_____

作者签名：_____ 日期：_____年____月____日

摘 要

随着大跨桥梁、高层建筑、核电站以及水库大坝等城市基础设施建设的高潮蓬勃迭起,作为城市基础设施重要结构构件的大体积混凝土层出不穷。最大限度地减小桥梁大体积混凝土温度裂缝是保证城市基础设施整体安全性的重要环节。随着人们对大体积混凝土认识的不断深入,越来越多的专家学者认为在大体积混凝土施工过程中引入一定的温控监测措施是必要的。但现有的温控监测手段存在布线困难、可靠性差、自动化程度低、无法有效进行长期监测等问题,不能满足桥梁大体积混凝土温控监测的需要。本文针对现今大体积混凝土温度监测手段的不足,结合最新的技术手段发展了一种一体化的监测系统,包含一种快速布设的无线传感节点;能够容纳上万个温度节点的大规模无线传感网络;能够实现混凝土温度信息的采集与存储、显示与预警、管理与分析的智能化监测软件;最后形成了集温度探头、传感器网络、监测软件为一体的大体积混凝土温控监测系统。从而更好的提升了大体积混凝土温控的信息化水平。

本文的主要研究内容如下:

(1) 针对大体积混凝土监测温度传感器布线困难的弊端,设计并实现了大体积混凝土温度监测的硬件系统。硬件系统包含一种快速布设的无线传感节点;包含一种能够容纳上万个温度节点的大规模无线传感网络;包含一种易于制作的光纤光栅温度传感探头;包含一种能够实现现场与远程监控的网络架构。

(2) 针对大体积混凝土温控参量长期依赖于人工计算的弊端,设计并开发了配套的大体积混凝土温度监测软件系统。软件系统实现了大体积混凝土中心温度、表面温度、里表温差、冷却水管温度、环境温度的实时显示与历史温度查询等功能。以及在此基础上实现了自动计算降温速率、最高温升等关键温控指标的功能。软件支持对多个监测任务进行统一管理,同时实现了温度在测点图上的直接显示以及监测数据导出到 Excel 的功能。

(3) 将研制开发的大规模无线温度监测系统分别应用于实际工程项目中。包括大体积混凝土模型试验温度监测项目、某大桥承台锚碇大体积混凝土温控监两个项目。

工程实践表明,该系统具有布设方便快捷、温度测点数量大、智能化程度高等优点,实现了对混凝土温度信息的自动采集与存储、显示与预警、管理与分析等应用需求,具有良好的工程应用前景。

关键词: 大体积混凝土; 无线传感器; 温度监测

Research of Large-scale Wireless Temperature Monitoring System for Mass Concrete

Abstract

In China, a large number of city infrastructures are being built every year such as large span bridges, high-rise buildings, nuclear power station and reservoir dam etc. The quality and safety are the key to the life span of the infrastructure under construction. Many approaches were taken, however, some critical region of the city infrastructures such as the suspension bridge, anchorage and pile caps of high-rise building foundation, nuclear power station dam are still suffering from the cracking issue. In recent years, temperature monitoring systems were utilized in the city infrastructure constructions. However, some drawbacks in the existing mass concrete temperature monitoring systems are still exist. For example there are a large number of wires connecting to the temperature sensors, the monitoring parameters need to be calculated by hand. These drawbacks make the installation of temperature monitoring system very time-consuming and the information is not real-time. In this paper a mass concrete temperature monitoring system is developed, the system includes wireless sensors, wireless sensor networks and a smart monitoring software.

The main contents are outlined below.

(1) Hardware for the mass concrete monitoring system was developed which includes wireless temperature sensors and sensor network, fiber grating temperature sensor and integrated monitoring system, onsite monitoring system, remote access system. The hardware of the mass concrete monitoring system allows the functionalities of multi-parameter monitoring, wireless sensing and harsh environments adaptive, local and remote access.

(2) Software for the mass concrete monitoring system was developed which can configure the sensors' data acquisition interval, diagnose sensor's health status, display the monitoring parameters such as inner temperature, surface temperature, inner-surface temperature difference, the cooling water temperature and the environment temperature both in 3D vision and in history curve. And the temperature changing rate and the maximum history temperature are calculated by the software automatically. All the data can be export to Excel file format. The software for the mass concrete fulfills the requirements of automatic monitoring and data management.

(3) The wireless mass concrete monitoring system developed was applied in a mass concrete experiment project and a mass concrete project for a bridge.

Applications of the monitoring system in two a real-world mass concrete construction projects proves the convenience and reliability of the system. The features of automatic acquisition and storage of data, display and warning of the temperature of the mass concrete, data management and analysis makes the system fulfills the requirements of the mass concrete temperature monitoring.

Key Words: Mass concrete; wireless sensor; temperature monitoring

目 录

摘 要	I
Abstract	III
1 绪论	1
1.1 工程背景	1
1.2 大体积混凝土温度监测研究现状	2
1.3 大体积混凝土温度监测系统发展趋势	5
1.4 本文主要研究内容	6
2 大体积混凝土温度监测系统硬件设计与实现	8
2.1 需求分析	8
2.2 技术选型	9
2.2.1 温度传感器选型	9
2.2.2 无线数据传输方案选型	11
2.3 硬件系统总体设计	12
2.4 无线温度传感网络实现	13
2.4.1 无线温度传感节点实现	15
2.4.2 中继路由器实现	16
2.4.3 协调器实现	17
2.4.4 通信协议设计	18
2.4.5 程序烧录	20
2.5 光纤光栅测温系统实现	22
2.5.1 光纤光栅测温原理	22
2.5.2 光纤光栅温度传感探头制作	22
2.5.3 系统集成	23
2.6 现场与远程监测实现	24
2.6.1 现场监测实现	24
2.6.2 远程监测实现	25
2.7 小结	27
3 大体积混凝土温度监测系统软件设计与实现	28
3.1 需求分析与设计	28
3.2 软件模块设计	29
3.3 软件开发语言、环境和开发工具	31

3.4 功能模块的实现.....	31
3.4.1 任务设置.....	32
3.4.2 传感器列表显示.....	34
3.4.3 三维模型显示.....	35
3.4.4 历史曲线.....	37
3.4.5 温控参量.....	38
3.4.6 数据导出.....	40
3.5 基础支持模块的实现.....	41
3.5.1 通信模块.....	42
3.5.2 数据帧校验与翻译模块.....	46
3.5.3 数据库模块.....	47
3.6 本章小结.....	49
4 工程应用.....	50
4.1 大体积混凝土模型实验温控监测.....	50
4.1.1 工程概况.....	50
4.1.2 测点布设.....	51
4.1.3 数据采集与分析.....	53
4.1.4 监测过程与结果.....	55
4.2 某大桥承台锚碇大体积混凝土温控监测.....	56
4.2.1 工程概况.....	56
4.2.2 测点布设.....	56
4.2.3 数据采集与分析.....	58
4.2.4 温控过程与结果.....	63
4.3 本章小结.....	64
结 论.....	66
参考文献.....	67
攻读硕士学位期间发表学术论文情况.....	71
致 谢.....	72
大连理工大学学位论文版权使用授权书.....	73

1 绪论

1.1 工程背景

随着我国经济的高速发展，大跨桥梁、高层建筑、核电站以及水库大坝等城市基础设施建设方兴未艾。城市基础设施负担城市经济、政治、文化平稳运行的重要使命，必须在最大限度上保证其施工质量^[1]。然而，大型城市基础设施的一些关键部位，如悬索桥的锚碇和承台^[2]、高层建筑的基础^[3]、水库大坝^[4]等，因其体积巨大，混凝土水化作用释放的热量聚集其中无法及时散发，从而使得其内部温度不断升高，如不加以合理控制，其内部温度往往可高达 $60\sim 80^{\circ}\text{C}$ ^[3-5]。水化热带来的高温使得大体积混凝土受热膨胀，于此同时位于底部的垫层或其他浇筑层对大体积混凝土还有一定的约束作用。在膨胀力和约束力双重作用下，在大体积混凝土内部产生了较大的温度应力^[6]。温度应力会使得混凝土内部微观裂缝扩张，微观裂缝逐渐演变成为宏观裂缝从而导致各种不同形式的温度裂缝的出现^[7-9]。综合国内外规范和工程实践，大体积混凝土的定义如下：大体积混凝土指具有结构形式接近于正方体、一次浇筑量大、水泥水化热较大、约束作用较大等特点的容易产生温度裂缝的混凝土。

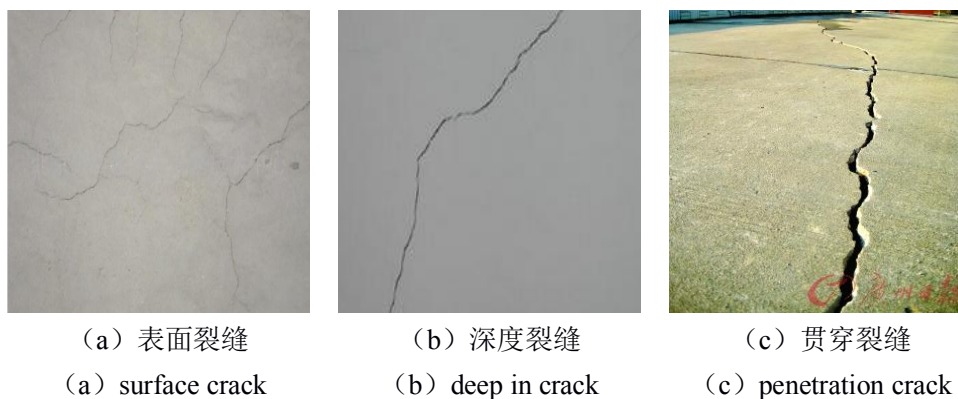


图 1.1 大体积混凝土温度裂缝示意图

Fig. 1.1 Thermal crack for mass concrete

根据混凝土内部和表面裂纹发生发展的情况不同，一般把由于温度原因产生的裂缝分为表面裂缝、内部裂缝、贯穿裂缝三种^[10]，如图 1.1 所示。大体积混凝土产生温度裂缝产生的机理可以从宏观角度和微观角度来加以解释。从宏观角度，当混凝土局部应力过大，大于混凝土同期抗拉强度即有可能发生开裂。从微观角度，混凝土内部由于水化反应、水分蒸发等，水泥石内部会存在一些微观孔洞，当局部应力过大时，在这些微观孔洞周围发生损伤。当损伤过大，发生的损伤逐渐连接为一体，即在局部形成微裂纹。

若应力继续积累，微裂纹将延混凝土的薄弱方向继续发展，形成深度裂纹，最终发展为贯穿性裂纹。表面裂缝对混凝土的美观性有一定影响，危害程度较小，一般无需特殊处理。内部裂缝在混凝土内部产生了薄弱面，具有一定的危害程度。贯穿裂缝的出现使得混凝土整体结构形式发生变化从而极大地影响了工程对象的受力特性，危害程度最高。为了最大限度减小大体积混凝土温裂缝发生和发展，一方面需采用合理的混凝土配合比设计，保证大体积混凝土在一定强度下具有较低的水化热产生^[11]；另一方面需采用对应的温度监测措施对混凝土各参量进行监测和控制^[12-17]。

如何更全面地获取大体积混凝土内部温度信息，并及时对大体积混凝土温度加以控制，是大体积混凝土温控防裂的重中之重^[18]。因此，采用先进的温控监测技术可以全面获取大体积混凝土内部温度信息，可以有效保障大体积混凝土温控作业的顺利开展，从而能够最大限度的减少大体积混凝土温度裂纹的产生和发展。

1.2 大体积混凝土温度监测研究现状

近年已建或在建的大型城市基础设施均针对工程所涉及的大体积混凝土温度进行监测^[19-24]。本文通过对以下几个典型实际工程的温度监测过程进行分析，以得出温度监测系统的研究现状以及发展趋势。

(1) 某基础底板大体积混凝土温度监测^[25]



主要性能指标：

- 测温范围：-30℃~+130℃
- 测温误差：≤0.5℃
- 分辨率：0.1℃
- 显示方式：三位半宽温型液晶显示屏
- 电源：9V积层电池一枚

图 1.2 JDC 型混凝土温度计

Fig. 1.2 JDC concrete temperature sensor

该大体积混凝土项目为基础底板大体积混凝土。在该项目的温度监测过程中，对环境温度、混凝土入模温度、混凝土内部温度、混凝土的应变等温控参量进行了监测。在

大体积混凝土基础底板内设置 9 个温度测点。温度测点传感器为 PN 结温度传感器，采用 JDC-2 型数字解调仪进行温度解调。

(2) 广州黄埔大桥大体积混凝土温度监测^[26]



- 主要性能指标:
- 测温范围-50℃~150℃
 - 工作误差±0.5℃
 - 分辨率0.1℃
 - 平均灵敏度-2.1mV/℃。

图 1.3 多路混凝土温度检测仪

Fig. 1.3 Multi-channel concrete temperature sensing system

广州珠江黄埔大桥全长 7049m，主跨 1108m。该桥为单跨悬索桥，包含两组承台。单副承台长 19.0m，宽 19.0m，高 6.0m。承台方量各为 2166m³，属于典型的大体积混凝土。为了监测施工期间大体积混凝土的温度特征，本次温控作业一共布设了 88 个温度测点。除了布设的 88 个温度测点用于监测大体积混凝土的温度特征外，同时对大气温度、冷却水温度等温控参量进行测温记录。在温度监测过程中使用了 PN 结温度传感器，采用 PN-4C 型读数仪进行读数。

(3) 飞龙岛大桥大体积混凝土温度监测^[27]



- 主要性能指标:
- 测温范围: -20℃~120℃
 - 工作误差: ±0.5℃
 - 分辨率: 0.25℃
 - 数据存储: 8880条记录

图 1.4 SZZX-ZHX 智能读数仪

Fig. 1.4 SZZX-ZHX temperature measuring system

飞龙岛大桥工程位于江西省，全长 1449.761m，主跨 150m。其承台混凝土设计强度为 C40。为确保无温度裂纹的发生，对大体积混凝土进行了全方位的监测。在温度监测过程中共布置 27 个温度测点，分别对混凝土内部温度、表面温度、气温、冷却水管进出口水温等进行了监测。采用了 JMT-36B 型压电温度传感器进行测温。采用 SZZX-ZHX 解调仪（图 1.4）进行读数。该仪器具有 1~6 个通道。

（4）琅岐闽江大桥大体积混凝土温度监测^[28]



主要性能指标：

- 测温范围：-50℃--120℃
- 测温点数：22路
- 传感器连接最大长度：50米
- 供电方式：终端：220V/AC
- 采集间隔：1-99分钟
- 测试精度：0.5℃
- 无线传输距离：视距3000M

图 1.5 HNTT-D 大体积混凝土温度测试仪

Fig. 1.5 HNTT-D mass concrete temperature monitoring system

琅岐闽江大桥大体积混凝土工程包括 4#主墩和 5#辅墩承台。在温度监测过程中，除了对混凝土内表温度进行监测之外，还进一步对大气温度进行了监测。采用 HNTT-D 测温仪进行温度监测。该仪器除了具有基础的数据记录功能之外，还具有查询历史记录和数据报表等数据管理功能，该系统能够进行无线远距离传输，在一定程度上实现了大体积混凝土测温的自动化。

以上工程采用不同的监测方法对大体积混凝土温度进行了监测，虽然达到了监测混凝土温度的目的。然而长期的工程实践揭示出了现存监测系统的不足：热敏电阻温度传感器具有严重的非线性特征造成元件难以精确测温，一旦损坏无法更换；热电偶温度传感器冷端需要温度补偿，对延长导线有特殊要求，探头和导线总体成本高；PN 结温度传感器需要特殊的供电电路，测温范围小，互换性差。且上述传感器均需要人工进行逐个标定，人工标定过程中难免引入误差，从而降低了传感器的精度。同时，测温元件带来的大量导线致使接线工作异常繁琐^[29-30]，从而进一步限制了温度监测系统的大规模应

用。在总线技术诞生后,温控人员能够把测温元件的引线统一接入到总线当中^[31-34],这样大大降低了线路布设的数量和难度,提高了测温的便利性。然而,总线所能够承载的传感器数量有限,且多个传感器的信号在总线上易于串扰;大量的引线管理困难,一旦总线损坏,所有传感器立即失效。在温控参量提取方面,如内部温度、表面温度、内表温差、降温速率等温控参量仍依赖于温控人员的现场计算。这种方法效率低,系统能够容纳的测点少,数据误差大,实时性低,无法满足大体积混凝土的现代化施工要求,常常错失了下达温控指令的最佳时机。

总结国内外关于大体积混凝土监测的方法和手段,现今仍然缺乏一种一体化的监测系统,包含一种无需标定、布设快速、适合大体积混凝土粗放式施工的传感探头以及布设方法;缺乏一种节点多、覆盖范围广的大规模无线传感网络;缺乏一种能够实现混凝土温度信息的采集与存储、显示与预警、管理与分析的智能化软件来确保大体积混凝土温控过程的顺利实施。

1.3 大体积混凝土温度监测系统发展趋势

近年来无线传感网络^[35]的发展解决了长期以来大体积混凝土温控监测面临“布线难”的问题。无线传感器网络是近几年新发展的一种新型技术,它是多个学科交叉的产物,具有计算机、通信、传感等多学科背景^[36]。无线传感器网络由于其能够容纳大量的温度测点,并且覆盖范围比较大,是一种对“布线难”问题的有效解决方案。其已经成功在多个生产领域实现成功应用^[37-38]。把无线传感器网络引入温控监测系统中来,将使监测系统从以有线布网、人工读数为中心的测量模式转向以信息和软件为中心的测量模式。从而实现大体积混凝土温度信息自动采集和传输,从根本上减轻温控人员的负担。通过回顾国内外桥梁大体积混凝土温控监测案例,我们认识到如何实现温度信息的自动采集、实时显示、自动记录、自动报警是未来温控发展的趋势。大体积温控需求一种融合温度传感器、传感网络、温控智能监测软件组成的一体化监测系统。由此得到关于温控监测系统的如下几个发展趋势:

(1) 温度传感探头的数字化 温度传感器是由物理传感器、电学模拟量传感器、电学数字量传感器逐渐发展起来的。传统的物理传感器需要人工读数,费时费力且存在着较大的观测误差,现今已经很少在实际工程中应用。电学模拟量传感器虽然还有应用,但是它面临着导线补偿、噪声大等诸多问题,使用前还需人工进行标定。电学数字量传感器集成敏感元件、AD 转换、数据处理与输出单元为一体,无需导线补偿和标定,具有高精度、抗干扰等优点,同时易于进行二次开发和系统集成。

(2) 温度传感节点的无线化 大体积混凝土体积大、结构复杂、施工粗放，给传统的有线传感器的应用带来了诸多困难。有线传感器引线多、长度长，需要在布设过程中格外小心并加以保护，稍有不慎便会损坏。同时，需要对导线进行专门管理，对每条引线粘贴关于其位置的标签。虽然总线技术在一定程度上解决了引线多的难题，但是总线一旦被损坏，全部传感器都会失效。某些种类的传感器，例如电阻式温度传感器，需要考虑引线补偿，过长的引线势必会对带来过大的系统误差。随着无线技术的兴起，将无线技术与新型的传感探头相结合，将会大大提升桥梁大体积混凝土温控监测系统的先进性。

(3) 温度传感节点的网络化 由于大体积混凝土施工需要分层浇筑，每层均需要布设传感器，用于温控监测的传感器总量大。传统的方法需要人工读数并记录，增加了温控人员的工作负担。利用无线传感器并形成网络，能够方便的在终端一次获并记录取所有传感测点的温度信息。

(4) 温度监测系统的智能化 大体积混凝土温度测点数量大，且存在同时监测两个浇筑层或多个浇筑层的情况（每层 10 个测点以上）。由此而带来的大量的传感器信息为温控监测参量的提取提出了新的挑战。为了温控人员能够及时的掌握温控参量信息的变化，需求一种能够根据采集的温控信息实时自动计算出相应的温控参量（如中心温度、表面温度、里表温差、降温速率、冷却水管温度、环境温度等）的智能化软件，并对照设定的温控参量阈值自动报警或自动提出个性化的温控措施建议。

1.4 本文主要研究内容

本文针对现有的温控监测手段存在布线困难、可靠性差、自动化程度低、无法有效进行长期监测等问题，在其基础上发展了一种一体化的监测系统，包含一种快速布设的无线传感节点；能够容纳上万个温度节点的大规模无线传感网络；能够实现混凝土温度信息的采集与存储、显示与预警、管理与分析的智能化监测软件；最后形成了集温度探头、传感器网络、监测软件为一体的大体积混凝土温控监测系统。从而更好的提升了大体积混凝土温控的信息化水平。

本文主要内容分为以下几个部分：

第一部分，分别介绍了大体积混凝土工程背景，开裂机理及监测的必要性；大体积混凝土温度监测研究现状及发展趋势；最后介绍了本文的主要研究内容。

第二部分，主要介绍了大体积混凝土温度监测系统硬件设计与实现，分别包含需求分析与设计；设备选型；无线温度传感网络实现；光纤光栅测温系统实现；现场与远程监控实现。

第三部分，大体积混凝土温度监测系统软件设计与实现，分别包含了需求分析与软件模块设计；开发语言、开发环境和开发工具的选择；软件各功能模块的实现；软件各个基础模块的实现。

第四部分，大体积混凝土温度监测系统工程应用，分别包含了大体积混凝土模型实验温控监测和某大桥承台锚碇大体积混凝土温度监测两个实际的工程应用项目。

本文的研究框架如图 1.6 所示。

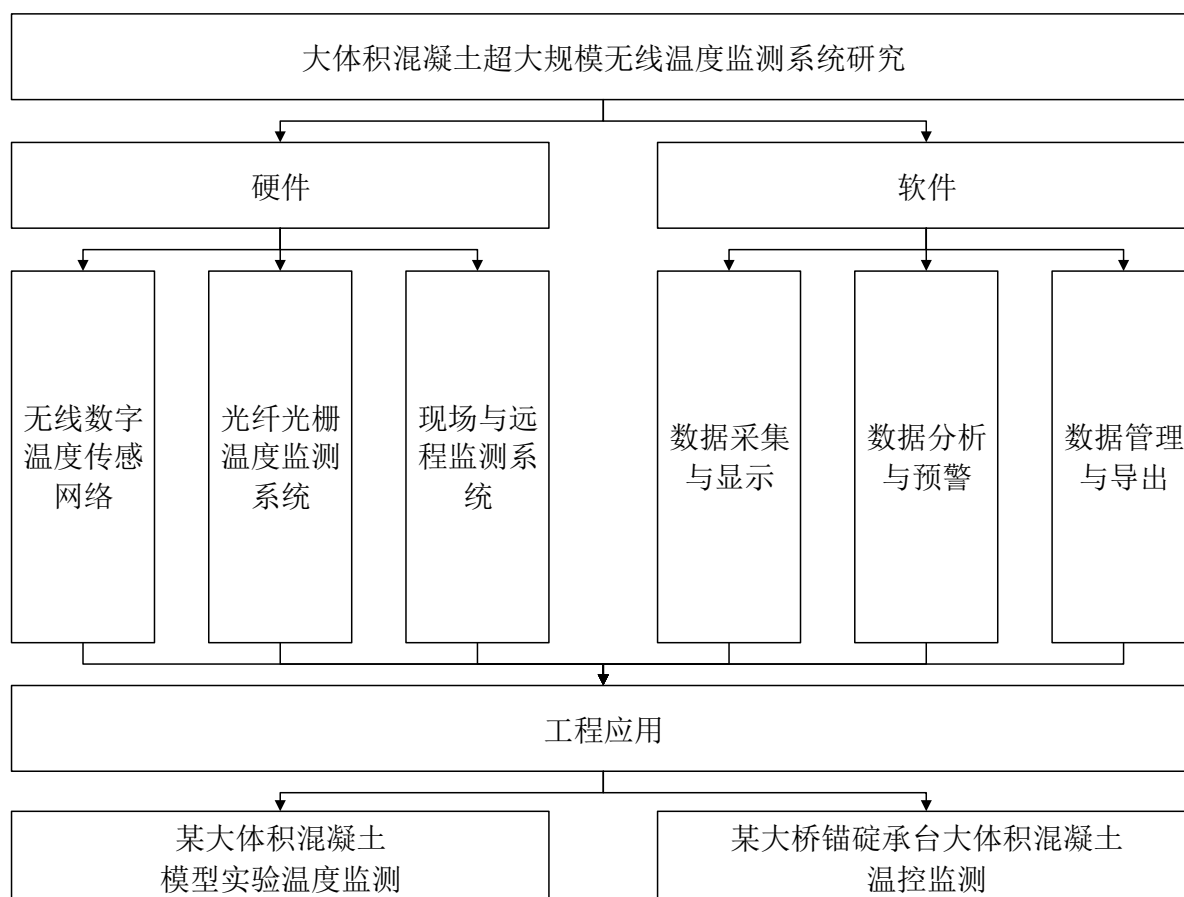


图 1.6 本文研究框架

Fig. 1.6 The research framework

2 大体积混凝土温度监测系统硬件设计与实现

为了能够使得本无线监测系统能够符合大体积混凝土温度监测的实际需求，并具有一定的先进性，本章在需求分析的基础上，通过对比选型，设计并实现了对应的硬件系统。

2.1 需求分析

根据《大体积混凝土施工规范》（GB 50496-2009）并结合温控实践，提出对温控系统的需求如下：

（1）监测内容的需求

温度监测系统应包含有：混凝土中心温度、表面温度、冷却水管温度、环境温度等监测参量。以及在此基础上自动计算混凝土内部与表面温差、每 4h 温度变化速率、最高温升等关键温控指标。大体积混凝土在浇筑后的最高温度应小于 75℃，降温速率应控制在每天 2℃ 以内。考虑到一定的冗余度，大体积温控监测系统应具有测温范围为 0~100℃。同时要求监测系统的分辨率必须优于 1℃。

（2）传感器无线化的需求

大体积混凝土体积大、几何形式复杂、测点分散、施工粗放。为了最大程度减轻传感器布设人员的劳动强度，缩短布设时间，需要每个温度测点都能实现无线数据传输。

（3）适应劣服役环境的需求

大体积混凝土施工现场环境恶劣，如灰尘、水和腐蚀性液体、焊接产生的火花、振捣产生的剧烈震动等，需要大体积混凝土温控系统特别是传感探头和信号传输线具有较高的可靠性，以免在传感器布设之后发生损坏。

（4）故障自诊断与自恢复的需求

大体积混凝土监测周期长达几周甚至数月，且需要实时采集数据。从自动化水平和减低人员劳动强度的角度来看，需要监测系统能够长期不间断运行。监测体系在运行时一旦遇到故障时能够自动恢复或者及时发出报警以最大减小故障发生所造成的损害。意外断电、探头损坏、电量不足、传感器连接断开等故障。

（5）远程访问的需求

由于施工现场常常和项目部有一定距离，且温度监测人员不能 24 小时留守施工现场，为了确保温控人员能够随时了解现场温度变化情况，需要实现现场温度数据的远程访问。

(6) 易用性需求

大体积混凝土监测系统直接面向工地现场的施工员使用，从用户群体的角度考虑，软件界面应当友好，使用应当方便。需要具有明确的功能划分、流程划分和提示功能。

2.2 技术选型

针对提出的各项需求，分别对温度传感器、无线数据传输方案进行对比选择，从而确保本系统具有技术先进、可靠性高的技术特征。

2.2.1 温度传感器选型

温度传感器作为直接感知混凝土内部温度信息的重要部件，直接决定监测系统的测温性能，根据需求分析，应满足测温范围宽（0~100℃）、分辨率较高（1℃）等技术指标。如图 2.1 所示，土木工程常用的温度传感器按照其感知机理一般可以划分为三类，即物理类、光学类^[39]和电学类^[40]。物理类温度传感器不具有大规模测温的实用性，因此以下仅选择电学类、光学类温度传感器进行对比探讨。

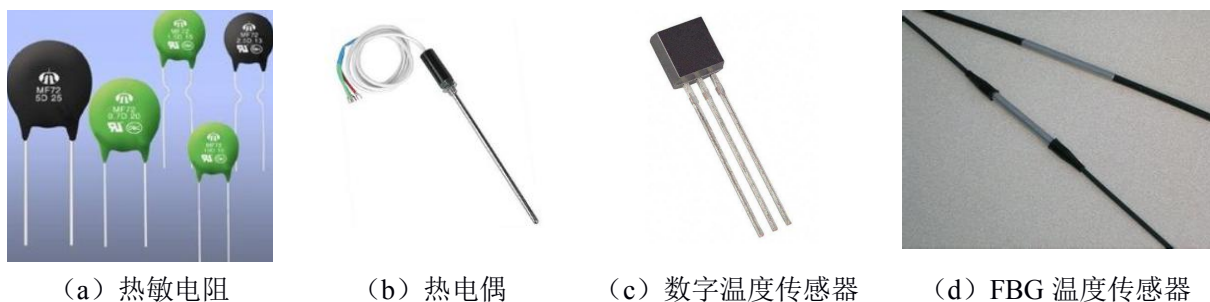


图 2.1 不同种类的温度传感器

Fig. 2.1 Different kinds of temperature sensors

(1) 热敏电阻

热敏电阻传感器的电阻值随着温度变化而变化^[41]，热敏电阻一般来说分为两大类，一类是正温度系数热敏电阻，另一类是负温度系数热敏电阻。正温度系数热敏电阻器的电阻值随着温度的升高而升高^[42]，负温度系数热敏电阻器的电阻值随着温度的升高而降低^[43]。热敏电阻测量的温度和电阻值相关，往往需要对导线电阻加以补偿。

(2) 热电偶

热电偶作为一种能够感知温度变化的元器件，其由两种不同成份的材质导体组成。两种不同成份的材质形成闭合回路，把两种不同成分材质放到不同的温度场中，两种不

是成分材质之间就会形成电压^[44]。通过电压和温度之间的关系即可得出温度。在测温时，要求其一端温度保持不变，才可以准确推导出另一端的温度^[45]。

（3）数字温度传感器

数字式温度传感器能够把测得的温度直接转换为数字量并输出^[46]。其直接输出数字信号，因此测量的温度和导线长度无关，不需要专门的导线补偿。并且数字信号方便计算机、PLC、智能仪表等数据采集设备直接读取，不需要专用的解调设备^[47-50]。并且数字传感器在出厂时已经逐个标定，并把标定信息一次写入其内部存储，在使用时直接可以读出温度。

（4）光纤光栅温度传感器

光纤光栅温度传感器是近些年来新发展的一种传感器。它由光栅作为其敏感元件^[51]。他通过光纤光栅的中心波长随着温度的变化来感知传感器所处位置的温度信息^[52]。由于器件本身是通过石英基体为主的光纤制成，因此他有着体积小、灵敏度高、不受外界磁场干扰等特点^[53]。另外，可以在一条光纤上串联多个光纤光栅传感器，从而大大简化线路的布设。

表 2.1 温度传感器指标对比

Tab. 2.1 Comparison of temperature sensors

	玻璃液体 温度计	热电偶 传感器	热电阻 传感器	DS18B20 传感器	光栅光纤 传感器
线性度	好	较好	较好	好	好
灵敏度	较好	好	较好	好	好
精 度	$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$	$\pm 2\%$	$\pm 2\%$	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$
抗电磁干扰	好	差	较好	好	好
受导线影响	-	大	大	中	小
探头费用	低	中	中	低	中
分布式功能	-	-	-	-	-

经过对比，数字传感器具有单线接口方式易于集成、测温范围大、误差小、支持多点组网的优点，较适合大体积混凝土较大规模测温的需要。最后选型号为 DS18B20 的数字温度传感器为温度敏感元件。其测温范围为 $-20^{\circ}\text{C} \sim +120^{\circ}\text{C}$ ，测温误差为 1°C 。DS18B20 通过 1-wire 技术可以把多个传感器并联在一条总线上，可充分利用 MCU 有限的 IO 接口^[54]。其工作电压较宽（ $3.0 \sim 5.5\text{V/DC}$ ）并且不需要任何外围元件，大大简化了电路。测量结果以 9~12 位数字量的格式发送到 MCU^[55]。另外，由于光纤光栅温度传感

器体积小、精度高、易于复用、不受外界磁场干扰，可以作为测温元件的补充。结合本课题组的优势，拟在裸光纤光栅的基础上自主研发一种零应变的光纤光栅温度传感器，来实现大体积混凝土内部温度的监测。

综上所述，选取数字温度传感器为主、光纤光栅温度传感器为辅进行大体积混凝土温度监测。

2.2.2 无线数据传输方案选型

无线传输是满足大体积混凝土体积大、结构复杂、测点分散等特殊条件下传感器布设需求的重要保证。采用无线数据传输能够最大程度减轻传感器布设人员的劳动强度，缩短布设时间。现今常用的无线传输方案一般有 Wi-Fi、蓝牙、ZigBee、GPRS 等。如表 2.2 所示，他们特点对比如下：

(1) Wi-Fi^[56]

Wi-Fi 是一种广泛使用的无线传输技术，常用于手机、电脑等移动端的无线连接。具有传输速度快（可达 300M），覆盖范围大（100m），发射功率相对较低（100mw）等特点。

(2) 蓝牙^[57]

蓝牙是作为一种低成本、低速、近场无线通讯技术，常用于手机、耳机、笔记本电脑等之间的通信。其传输速率较低（1Mbps），通信距离较短（10m），支持点对点以及点对多点互传信息。

(3) ZigBee^[58]

ZigBee 是一种无线通讯网络方案。一般通讯距离可达到 75m，并且能够通过路由器扩展其无线信号的覆盖范围。其支持的节点数可以达到 65000 个以上。一般用于电池供电的传感器互联使用。其功耗很低，芯片便宜，支持的节点数量多，数据传输的可靠性高，并且可以实现零配置自动组网，网络自愈合等功能。

(4) GPRS^[59]

GPRS 数据传输是通过移动运营商（移动、联通、电信）架设的网络基站连接到互联网从而实现数据远程传输的技术。由于使用了互联网来传输数据，理论上可以实现覆盖全球的数据传输。GPRS 数据传输速率一般为 56-114Kbps。

表 2.2 无线传输方案性能比较

Tab. 2.2 Comparison of several wireless transmission scheme

	WiFi	蓝牙	ZigBee	GPRS
传输距离	100 米	10 米	75 米	>1000 米
传输速率	300Mbps	1Mbps	20Kbps	56-114Kbps
节点数	256 个	1 个	65535 个	1 个
成本	高	中	低	高
功耗	高	中	低	高

经过对比，ZigBee 无线数据传输技术由于其功耗低、自组网、自愈合的突出特点比较适合大体积混凝土温度监测节点无线互联；GPRS 由于其出色的远程传输性能，比较适合大体积混凝土监测系统远程数据传输。

2.3 硬件系统总体设计

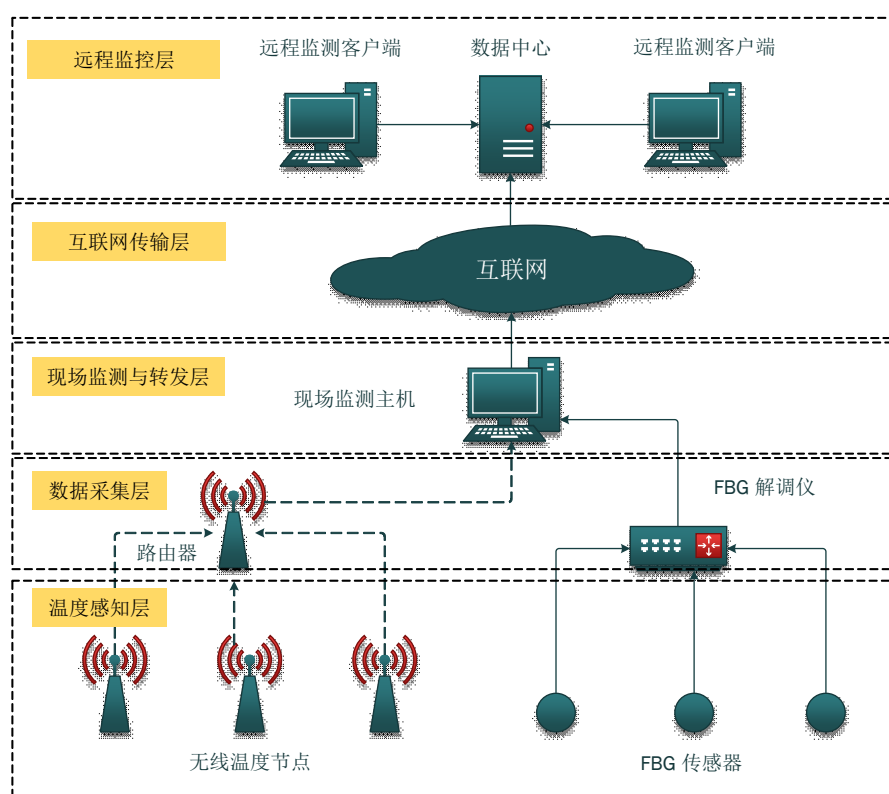


图 2.2 硬件系统框架图

Fig. 2.2 Framework of hardware system

在需求分析与技术选型的基础上,为了使得系统功能划分明确,采用层次设计方法设计出如图 2.2 所示的大体积混凝土温度监测系统。系统共包含五层架构,从底层到顶层分别是:温度感知层、数据采集层、现场监测与转发层、互联网传输层、远程监测层。各层的功能分别如下:

(1) 温度感知层

温度感知层通过温度探头来捕捉监测的温度等信息,并通过无线节点经由无线方式把数据发送到采集层。温度感知层采用了无线温度传感器为主和光纤光栅温度传感器为辅的温度感知方案。无线温度传感器通过无线连接到数据采集层对应的路由器上,光纤光栅温度传感器通过光缆连接到数据采集层对应的光纤光栅解调仪上。

(2) 数据采集层

数据采集层用来采集温度感知层上报的温度数据。该层包含了用于采集无线温度传感器温度数据的无线接收器和用来采集光纤光栅温度信息的光纤光栅解调仪。

(3) 现场监测与转发层

现场监测与转发层汇集数据采集层上报的温度数据,经过统一处理之后,交付给在现场监测主机上安装的大体积混凝土温度监测软件处理。如需要远程监测,由现场监测主机把数据统一发送到远程服务器上。

(4) 互联网传输层

互联网传输层借助互联网运营商(联通、移动、电信)搭建的网络,把现场的温控数据传输到远程监测主机上。

(5) 远程监测层

远程监测层的数据服务器通过互联网收集多个施工现场的温控数据,并为远程客户端提供通过网页显示温度数据的服务。远程客户端可以登录远程监测数据服务器并通过浏览器访问温度数据,以方便温控专家能够及时把握温控数据和提出温控建议。

2.4 无线温度传感网络实现

依据技术选型,选用 ZigBee 无线传输技术来实现现场温度传感器的无线传输。ZigBee 组成的网络由三类模块组成。分别是:协调器模块、路由模块、终端模块,各模块的关系如图 2.3 所示。

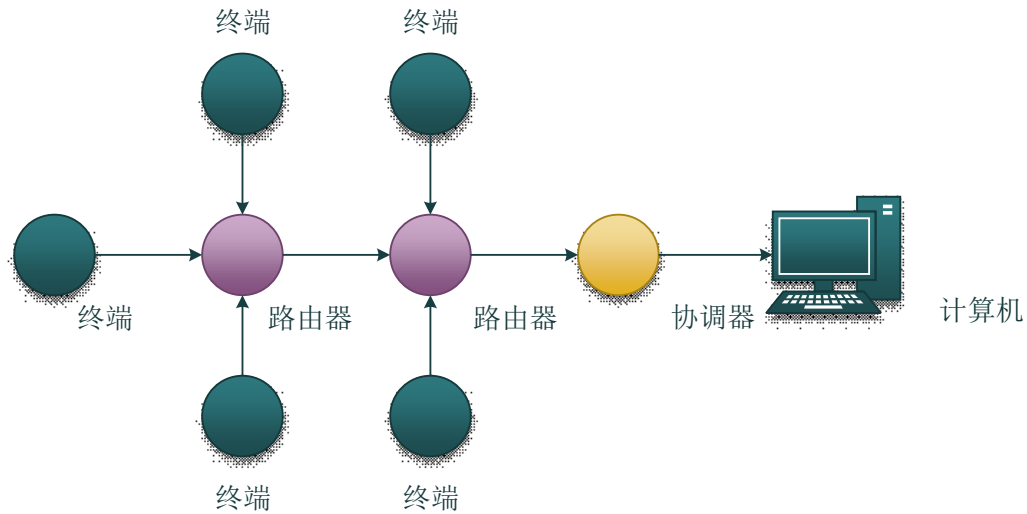


图 2.3 ZigBee 无线传感网络框架

Fig. 2.3 Framework for ZigBee wireless sensor network

他们的主要功能分别如下：

（1）协调器模块

协调器作为整个网络和计算机连接的设备，负责接收整个网络上传的数据并发送给计算机。同时，负责协调整个网络的建立。计算机可以通过协调器向整个网络的任意设备发送命令，从而配置终端模块的各项参数。

（2）路由模块

在协调器无法覆盖终端模块时，路由模块起到中继作用，可以把终端模块的数据通过路由模块中转之后发送到协调器模块，从而拓展了整个网络的覆盖范围。

（3）终端模块

终端模块是构成整个传感网络的基本单元，负责把温度传感器的数据调制成为无线电波，直接发送给协调器或者通过路由器的多跳传输发送给协调器。

本系统选用了 CC2530 芯片来分别实现构成 ZigBee 网络的各模块。CC2530 芯片结合了领先的 RF 收发器的优良性能以及包含了 8051CPU、8KB RAM、256K 闪存等片上资源。CC2530 芯片的优良的性能使得构建 ZigBee 的协调器模块、路由模块和终端模块可以实现统一的硬件和软件设计。CC2530 芯片的特点见表 2.3。

表 2.3 CC2530 芯片特点

Tab. 2.3 Features of CC2530

单元	特点
SoC	<ul style="list-style-type: none"> ● 内涵 8051MCU ● 2.4GHzRF 收发器 ● 电压范围: 2.0~3.6V;
8051 MCU	<ul style="list-style-type: none"> ● 精简指令集, 频率 32M, 单指令周期。 ● 大容量 Flash ● 8-KB RAM
RF 收发器	<ul style="list-style-type: none"> ● 兼容 2.4-GHz IEEE 802.15.4 ● 接收灵敏度: -97dBm ● 输出功率高达: 4.5 dBm
片内外设	<ul style="list-style-type: none"> ● 睡眠定时器, 低功耗设计使用。 ● 12 位 ADC, 温度传感器, 电池电压测量功能等。 ● AES 安全协处理器, 支持 AES128 加密解密 ● USART ● 21 个通用 I/O 引脚 ● 看门狗定时器

2.4.1 无线温度传感节点实现

本系统所采用的 CC2530 所需外围器件很少, 主要包括晶振、晶振、射频网络器件。无线温度传感节点天线采用内置 PCB 天线, 极大的减小了无线温度传感节点的尺寸, 无线温度传感节点在空旷环境最大传输距离可达 50 米。根据 CC2530 的设计手册对 CC2530 的原理图进行详细的设计, 并用 Altium 公司的 EDA 软件 PROTEL 绘制出的无线温度传感节点的原理图如图 2.4 所示, 在原理图的基础上委托 PCB 代工厂制成的实物图如图 2.5 所示。在 IAR 嵌入式集成开发环境对片上软件进行开发并用烧写器把软件烧录到制作好的芯片中。

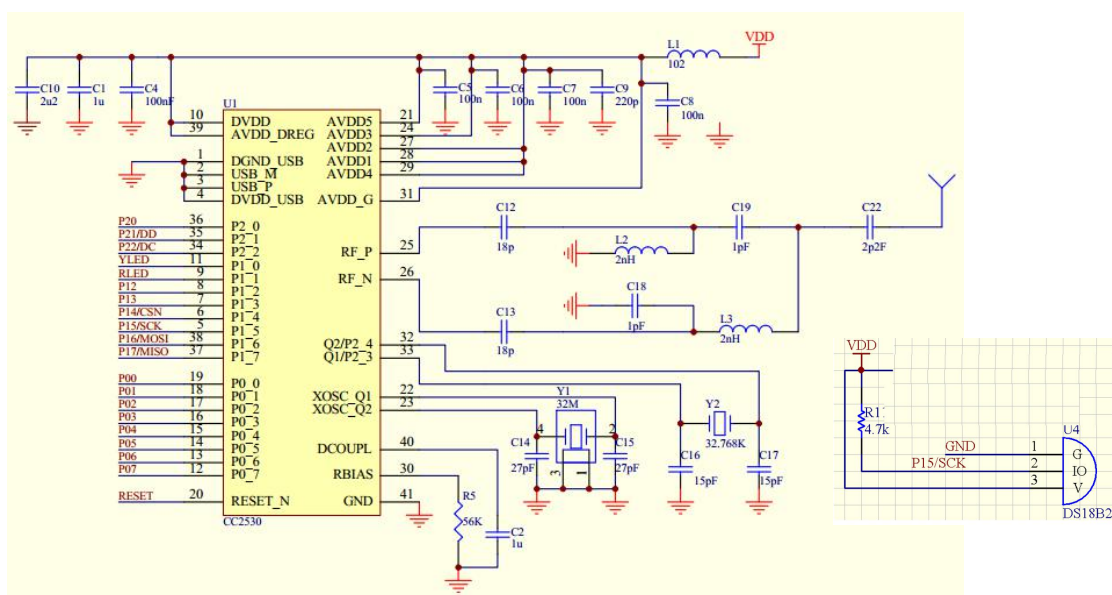


图 2.4 无线温度传感节点原理图

Fig. 2.4 Schematic design for wireless sensing node



图 2.5 无线温度节点实物图

Fig. 2.5 The actual object of wireless sensing node

2.4.2 中继路由器实现

中继路由的原理图和无线温度传感节点的原理图基本一致，但采用了外置天线。其制成的无线传感模块灵敏度高，发送距离远（可达 150 米）。其原理图与无线传输节点类似。在原理图的基础上委托 PCB 代工厂制成的实物图如图 2.6 所示。在 IAR 嵌入式集成开发环境对片上软件进行开发并用烧写器把软件烧录到制作好的芯片中。

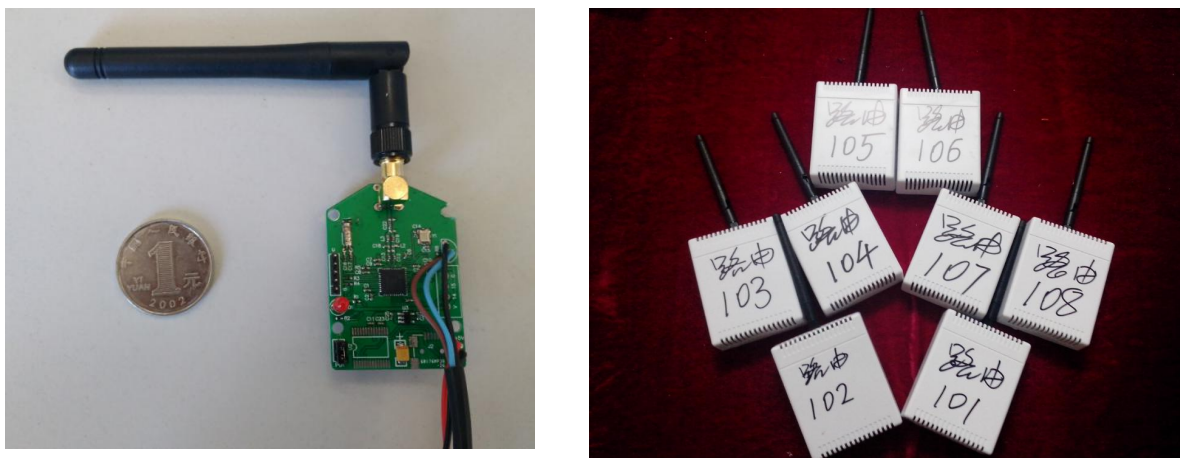


图 2.6 中继路由实物图

Fig. 2.6 The actual object of router

2.4.3 协调器实现

协调器在中继路由器的基础上，增加了 USB 接口电路，采用了 FT232 的 USB 转 TTL 解决方案，其原理图如图 2.7 所示。在原理图的基础上委托 PCB 代工厂制成的实物图如图 2.8 所示。在 IAR 嵌入式集成开发环境对片上软件进行开发并用烧写器把软件烧录到制作好的芯片中。

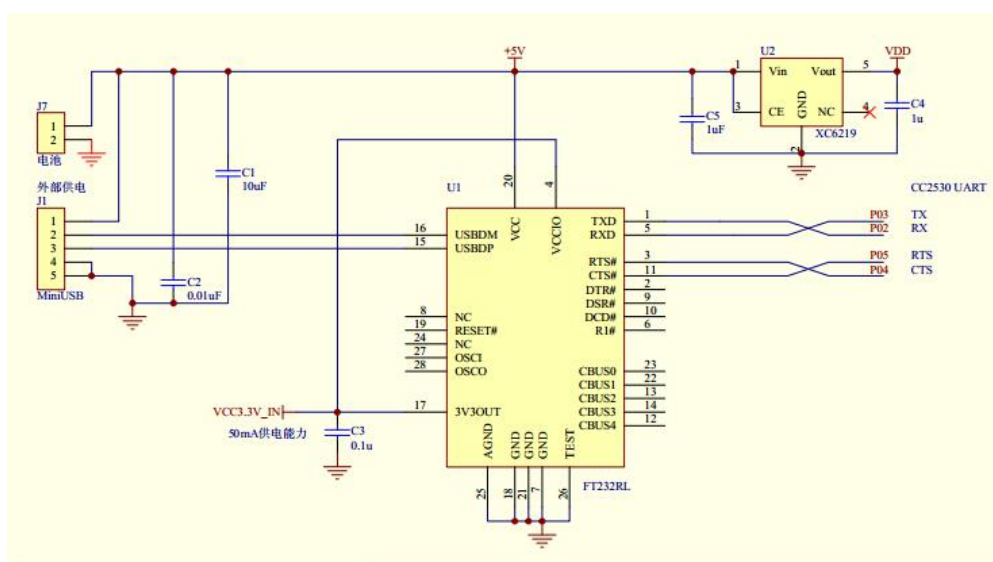


图 2.7 USB 接口电路原理图

Fig. 2.7 Schematic design for USB port

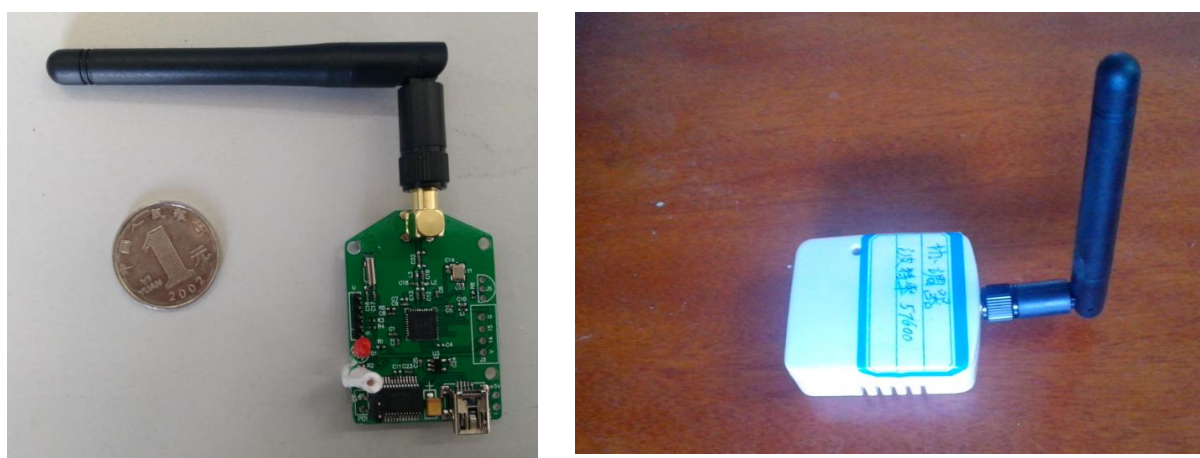


图 2.8 协调器实物图

Fig. 2.8 The actual object for coordinator

2.4.4 通信协议设计

通信协议定义了 ZigBee 网络模块（如协调器节点、路由节点和终端节点）和计算机通信的方式。通过通信协议的设计，可以定义和实现网络复位、各节点的网络地址设置与获取、协调器启动与关闭、协调器数据上报、节点参数设置等功能。同时，通信协议作为上位机软件与无线传感网络硬件交互的方式，奠定了上位机软件设计的基础。

（1）网络复位协议

网络复位协议用于设置网络的地址，并且复位整个网络到初始状态。设置完成，系统重启，组建新的网络。终端节点和路由节点也需要重新加入新的网络。其详细的格式见表 2.4 所示。

表 2.4 网络复位协议格式

Tab. 2.4 The protocol for reset the network

	帧头	长度	命令	网络地址	控制字	校验
长度	1	1	2	2		FCS
默认值	FE	08	0010	0x01-0xFF	0 或 1	和校验

例如：

发送:FE 08 10 00 FF F0 01 06（设置网络地址为：0xFFF0）

(2) 协调器控制协议

协调器控制协议定义了用来开启和关闭协调器的命令，同时定义了清除协调器配置的命令。协调器开启，则其他网络节点能够加入网络，协调器开始上报数据，指示灯亮。协调器关闭，则整个网络停止，协调器停止上报数据，指示灯灭。清除协调器配置，清除了包括网络 ID，联网的节点信息在内的数据，然后重新启动。协调器控制协议内容如表 2.5 所示。

表 2.5 协调器控制协议

Tab. 2.5 The coordinator control protocol

协议作用	协议内容	效果
协调器开启	FE 06 11 00 01 16	协调器开始上报数据，指示灯亮
协调器关闭	FE 06 11 00 00 15	协调器停止上报数据，指示灯灭
清除协调器配置	FE 06 11 00 02 17	清除协调器配置然后重新启动

(3) 协调器数据上报协议

协调及数据上报协议描述了协调器收到无线温度节点上报温度、电池电压、自定义编号等信息后转换为数据帧发送到计算机的格式。协调器数据上报协议内容如表 2.6 所示。

表 2.6 协调器数据上报协议

Tab. 2.6 The coordinator data transmission protocol

	帧头	长度	命令	节点地址	温度	保留	电池电压	节点编号	校验
长度	1	1	2	2	2	2	1	2	FCS
默认	FE	0E	0012	0x01-0xFF					和校验

例如：FE 0E 12 00 01 00 E1 00 8A 02 52 00 DE

解释为：地址 0001 温度：22.5 保留：650 电池：82 自定义编号：0

(4) 节点参数设置协议

节点参数设置协议描述了设置节点的各个参数（如节点地址、采集间隔、节点编号）时，上位机与节点间交互的方式。节点参数设置协议内容如表 2.7 所示。

表 2.7 节点参数设置协议

Tab. 2.7 The protocol for node parameter setting

	帧头	长度	命令	节点地址	采集间隔	节点编号	校验
长度	1	1	2	2	2	2	FCS
默认值	FE	0B	0013	0x0001-0xFFFF			和校验

数据帧头：0xFE

命令字：0X0013

要设置的节点地址：0x0001-0xFFFF

数据采集时间间隔：1-65535 秒

节点编号：0-65535 默认为 1

返回：设置成功 FE 06 13 00 01 18 设置失败 FE 06 13 00 00 17

2.4.5 程序烧录

在 IAR 嵌入式集成开发环境中采用 C 语言对以上节协议进行实现。在代码准备好后，进行如下步骤把程序分别写入无线温度节点、中继路由和协调器中。

(1) 编译源程序：

如图图 2.9 所示，选择对应的工程。

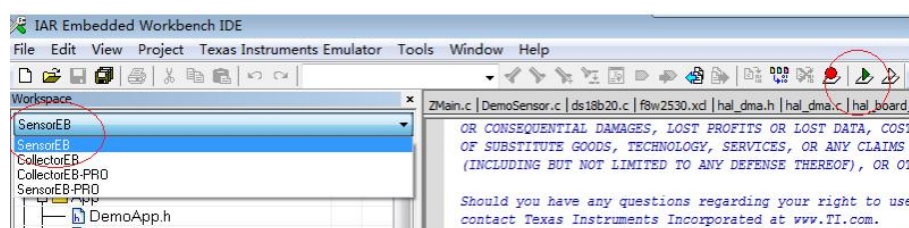


图 2.9 程序烧录步骤 1-1

Fig. 2.9 Burning of program step 1-1

如图 2.10 所示，选择重新编译所有文件，约几十秒的时间后编译完成。按下 Debug，稍等片刻后程序写入 CC2530 芯片。

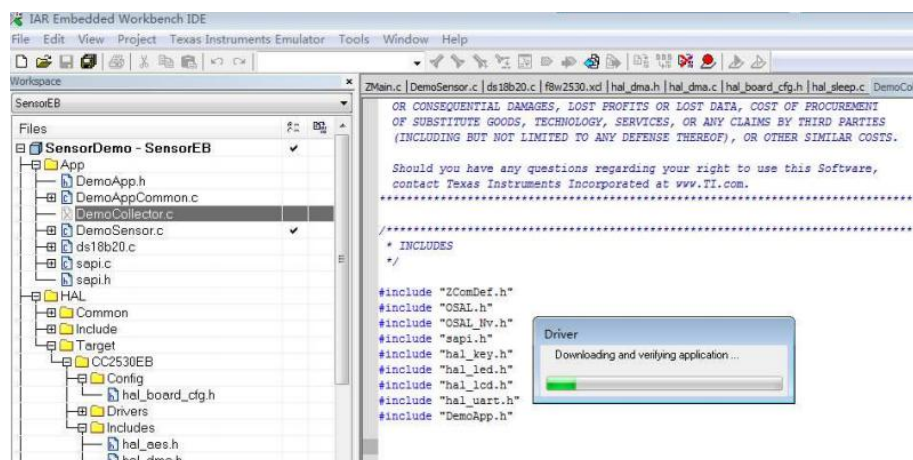


图 2.10 程序烧录步骤 1-2

Fig. 2.10 Burning of program step 1-2

点击 Stop Debugging，拔掉仿真器线，将模块插入电池板，并关掉电源。这样便完成了一个终端节点的制作。重复上述步骤，可以制作多个终端节点。

(2) 下载协调器程序

如图 2.11 所示，定义 COORDINATOR 并把 ROUTER 注释掉。这样程序在编译过程中会生成对应的协调器程序。

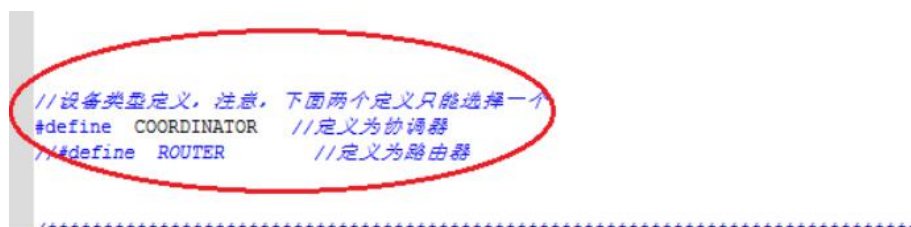


图 2.11 程序烧录步骤 2

Fig. 2.11 Burning of program step 2

按照类似于无线温度节点的烧写方法，烧写协调器程序。

(3) 下载路由器程序

保持下载协调器程序界面不动，打开 Collector.c 文件，设置设备类型。如图 2.12 所示，定义 ROUTER 并把 COORDINATOR 注释掉。

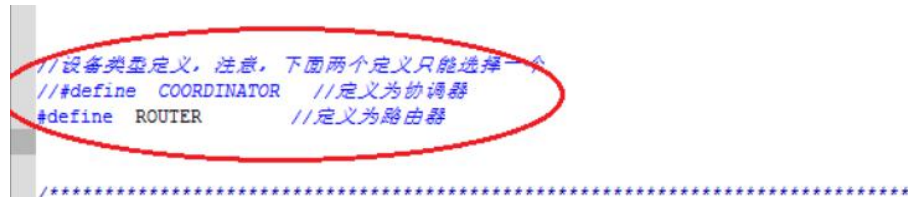


图 2.12 程序烧录步骤 3

Fig. 2.12 Burning of program step 3

重新编译所有文件，等待编译完成，需要十几秒的时间。按下 Debug，稍等片刻之后完成程序的烧录。

2.5 光纤光栅测温系统实现

本系统选择光纤光栅作为无线温度传感器的补充，依赖光纤光栅的高精度、高灵敏度、抗干扰等优良特性来提高整套测温系统的测温性能。整套光纤光栅测温系统从光栅光纤测温原理切入，开发了一种毛细黄铜管封装的光纤光栅测温探头及其布设工艺，最后探讨了光纤光栅测温系统的集成方案。

2.5.1 光纤光栅测温原理

光纤光栅温度传感器是由光纤光栅为敏感元件的一种全光学式传感器^[60]。他通过光纤光栅的中心波长随着温度的变化来感知传感器所处位置的温度信息。由于器件本身是通过石英基体为主的光纤制成，因此他有着体积小、灵敏度高、不受外界磁场干扰等特点^[61]。其波长和温度的关系如式所示：

$$\Delta\lambda = \Delta T\alpha$$

其中： $\Delta\lambda$ 是光纤光栅中心波长的变化

ΔT 是环境温度的变化

α 是传感器的灵敏度，一般取 $10\text{pm}/^\circ\text{C}$ ^[62]

由上式可知，当光纤光栅温度传感器所处环境的温度变化时，光纤光栅的中心波长发生相应的变化，从而可以由光纤光栅波长变化量计算出环境温度的变化。

2.5.2 光纤光栅温度传感探头制作

由于光纤光栅波长对应变敏感，故制成的光纤光栅温度传感器必须处于无应变环境中^[63]。同时考虑到封装材料应该具有较强的导热性，考虑用铜管对光纤光栅进行封装。设计如图 2.13 所示的光纤光栅温度探头：

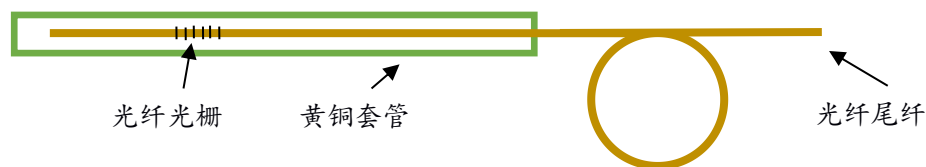


图 2.13 光纤光栅温度传感器设计图

Fig. 2.13 The design for FBG temperature sensor

根据设计制作出光纤光栅温度传感探头如图 2.14 (a) 所示, 实际现场布设图如图 2.14 (b) 所示。



(a) 制作好的温度传感探头



(b) 探头现场布设

(a) The actual FBG temperature sensor (b) The deployment of the temperature sensor

图 2.14 光纤光栅温度传感器实物图

Fig. 2.14 The actual object for FBG temperature sensors

2.5.3 系统集成

为了确保温度测试的精度, 本文选用了美国 Micron Optics 公司生产的 SM125 光纤光栅解调仪。SM125 的扫描频率为 1HZ, 单通道的光纤光栅解调能力为 40 个光纤光栅传感器^[64]。SM125 光纤光栅解调仪如图 2.15 所示, 其性能指标如表 2.8 所示。

表 2.8 sm125 性能指标

Tab. 2.8 Features of sm125

参数	通道	波长范围	精度
指标	4	1510-1590nm	1pm



图 2.15 sm125 光纤光栅解调仪

Fig. 2.15 sm125 FBG demodulator

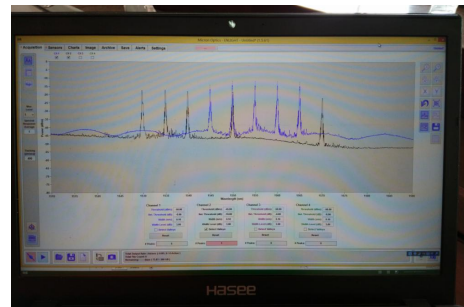


图 2.16 测试界面

Fig. 2.16 Software interface during testing

根据系统硬件总体设计方案,大体积混凝土施工现场引出的光纤光栅温度传感器采用串行的方式接到 SM125 光纤光栅解调仪上,SM125 光纤光栅解调仪再通过 LAN 端口连接到现场监测主机上,从而完成了温度数据的获取和传输。测试界面图 2.16 所示,该通道串联了 9 个光纤光栅,可以通过软件读出其中心波长。

2.6 现场与远程监测实现

本系统采用了现场与远程监测相互协同的工作方式。现场监测负责该施工现场的所有监测任务的数据显示与管理。远程监控可以同时收集多个现场监测数据并通过互联网终端访问。现场监测系统方便施工人员把握大体积混凝土温度信息,远程监测系统方便业主与温控专家来跟踪多个区域的温度信息。

2.6.1 现场监测实现

现场监测由无线数据接收器、现场监测主机、路由器和电源模块组成。无线接收器负责接收由无线信号传输层发送的无线温度信息。现场监测主机运行大体积混凝土温控监测软件,实时显示收到的温度数据。路由器把温度数据通过互联网发送到远程监测室。由于施工现场不能保证稳定的供电,并且大型工程设备造成的供电污染(电流电压波动)有可能会对监测系统造成潜在的损害。因此,特别增设供电模块。供电模块由 UPS 和附加的电池组组成。UPS 把 220V 市电转换为直流电并贮存到电池组中。监测系统使用的交流电是由电池组的直流电经过 UPS 的逆变器变换而来。因此,监测系统的供电不受市电波动的影响。现场监测服务器的原理图如图 2.17 所示,其实物图如图 2.18 所示。

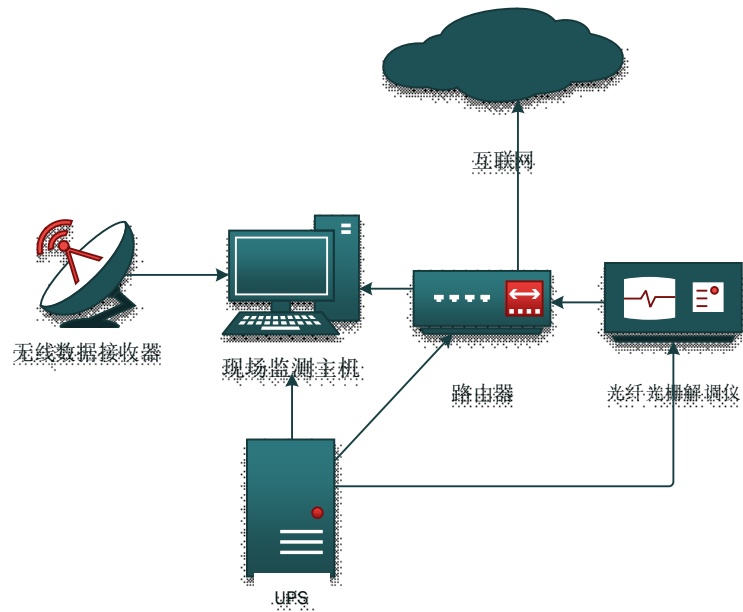


图 2.17 现场监测服务器原理图

Fig. 2.17 The schematic design for on-site monitoring server

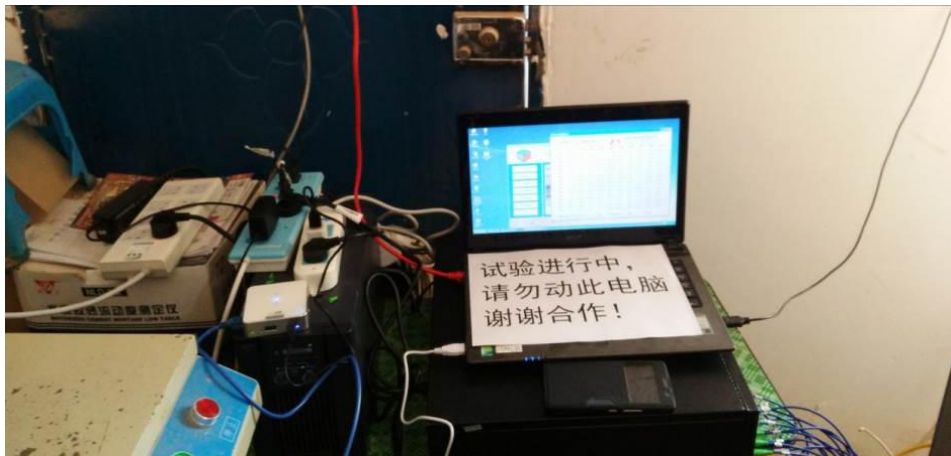


图 2.18 现场监测主机实物图

Fig. 2.18 The actual object of on-site monitoring server

2.6.2 远程监测实现

远程监测采用 C/S 的设计方案, 采用分布式处理、集中式存储的策略来实现同时收集多个施工现场的温度数据并能够实现多个不同客户端的远程在线实时访问。如图 2.19 所示, 远程监测系统包含施工现场监测服务器、Linux 服务器和客户端三个模块。

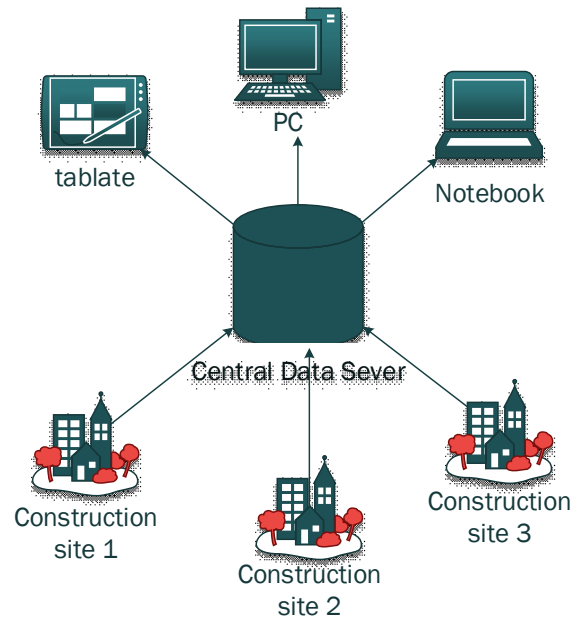


图 2.19 远程监测服务器原理图

Fig. 2.19 The schematic design for remote monitoring server

（1）施工现场监测服务器

详见 2.6.1 节所述。

（2）Linux 服务器

Linux 服务器用来收集现场服务器的数据，并且向客户端提供远程数据服务。服务器端采用 Linux 平台，其上运行 Apache Web Server 服务、MySQL 数据库服务和 sensor sever。Sensor sever 采用 C 语言编写，用于通过互联网收集各施工现场的温控数据并存储到 MySQL 数据库中。利用 PHP 语言生成动态网页通过 Apache Web Server 来为客户端提供查询服务。

（3）客户端

客户端可以是任意一台连接到互联网的设备，例如：移动电话、笔记本电脑、台式电脑以及平板电脑等。客户端在浏览器里输入指定的网址（目前，内网访问网址为：<http://192.168.9.106/index.php>，外网访问网址为：<http://202.118.74.46/index.php>）即可以访问远程监测系统，如图 2.20 所示。



图 2.20 客户端界面

Fig. 2.20 Client interface

2.7 小结

本章针对大体积混凝土体积大、结构复杂、测点分散、施工粗放等特点，以及结合大体积混凝土温控实践，对大体积混凝土无线温度监测系统的需求加以分析，提出了监测内容的需求、传感器无线化的需求、适应恶劣服役环境的需求、故障自诊断与自恢复的需求、远程访问的需求和易用性需求等。

在需求分析的基础上，针对温度传感器、无线数据传输方案进行技术选型。经过对比，最终选取数字温度传感器为主、光纤光栅温度传感器为辅进行大体积混凝土温度监测。并选取 ZigBee 无线数据传输基础来实现大体积混凝土温度监测节点无线互联，GPRS 远程数据传输来实现大体积混凝土监测系统远程监控。

在需求分析与技术选型的基础上，提出了包含五层架构的大体积混凝土温度监测系统框架。框架包含温度感知层、信号传输层、现场监测与转发层、互联网传输层和远程监测层。并对每层所需要实现的功能进行详细的分析与定义。针对无线温度传感网络，对涉及到的无线温度传感节点、中继路由、协调器的硬件进行了设计与实现。针对光纤光栅测温系统，在对光纤光栅测温原理进行了探讨的基础上自主研发了一种零应变光纤光栅温度传感探头并把开发出的光纤光栅温度传感探头集成到整个监测系统中。最后，针对现场监测和远程监测进行了设计与实现。

3 大体积混凝土温度监测系统软件设计与实现

为了能够使得研发出的无线监测系统软件能够符合大体积混凝土温度监测的实际需求，本章在需求分析的基础上，采用 C#语言和 Microsoft Visual Studio 2013 开发环境设计并实现了软件的各项功能模块和基础支持模块。

3.1 需求分析与设计

(1) 监测参量的需求

温度是大体积混凝土监测与控制的核心指标，以及在温度的基础上获取的温差以及降温速率是采取温控措施的重要依据。因此，监测软件应实现对大体积混凝土中心温度、表面温度、里表温差、冷却水管温度、环境温度的实时显示与历史温度查询。以及在此基础上获得降温速率、最高温升等关键温控指标。

(2) 多任务的需求

大体积混凝土常常划分多个浇筑层并存在多个浇筑层同时施工的情况。为了能够使多个浇筑层的温控任务可以同时展开，互不干扰，需要软件可以划分浇筑层，并对每个浇筑层内的传感器进行单独管理。

(3) 数据管理的需求

大体积混凝土测点多，监测周期长，在监测过程中会带来海量的数据文件，如果没有统一的数据管理机制，很难确保数据不会混淆、丢失和覆盖。这就需要监测系统能够对采集的数据加以统一分类和管理。

(4) 易用性的需求

为了使温度显示更加直观，应把温度直接显示在大体积混凝土测点图上。同时，软件应能自动生成测点温度变化曲线，以便温控人员能够及时了解大体积混凝土内部温度变化趋势，及时采取温控措施。为了满足温控人员后续数据分析的需求，需具有把温控数据按照指定的时间间隔导出到 Excel 表格的功能。考虑到大体积混凝土施工间歇期短，需要同时监测多个大体积混凝土浇筑层。因此，需要监测软件能够同时对多个任务进行管理。

(5) 稳定性的需求

大体积混凝土施工周期长，多个浇筑层交替施工，整个过程往往需要几个月时间。在施工期间，需要监测软件不间断运行。需要在软件设计时，采取一定措施，使得软件在非致命错误中自动恢复，并且数据不会丢失。

3.2 软件模块设计

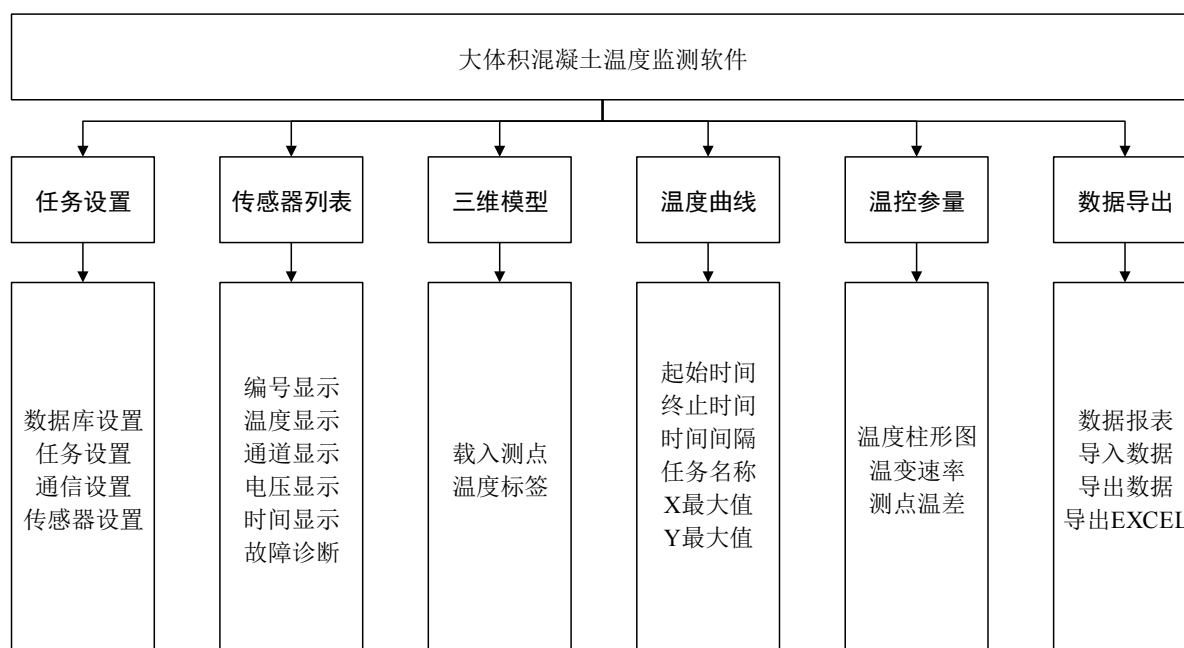


图 3.1 大体积混凝土监测软件功能框图

Fig. 3.1 The framework for the monitoring software

在需求分析的基础上，把软件系统划分六大功能模块。如图 3.1 所示，分别是任务设置、传感器列表、三维模型、温度曲线、温控参量、数据导出。另外，为了为功能模块提供服务，设计了包含三个模块的软件内核，分别包括通信模块、数据处理模块、数据库模块。他们的作用分别如下：

(1) 任务设置

任务设置模块包含数据库设置、任务设置、通信设置和传感器设置。数据库设置负责设置本地数据库的路径、远程数据库 IP 地址；任务设置负责设置温控任务所包含的传感器通道、编号、位置等信息；通信设置负责协调器端口号和波特率；传感器设置负责设置传感器的采集时间间隔和通道编号。

(2) 传感器列表显示

传感器列表显示是针对每个温度测点，显示其传感器编号、温度、通道、电压、最后更新时间以及状态信息（如传感器电量低、传感探头异常等信息）。

（3）三维模型显示

三维模型显示模块载入每个温控任务的测点图，并把每个测点的温度直观显示在测点图上。

（4）历史曲线

历史曲线模块用于显示传感器温度历史信息。模块能够根据输入的查询条件（起始时间、终止时间、时间间隔、任务名称、Y 轴最大最小值）绘制对应温度监测任务的所有传感器温度曲线。

（5）温控参量

温控参量模块用于显示温差和降温速率等温控参量。该模块能够显示每个任务内所有传感器的温度柱形图，以方便判断温差。同时软件能够自动计算并显示各点的温变速率与核心表面温差。

（6）数据导出

数据导出模块用于显示数据报表并导出到 Excel 文件。模块能够根据查询条件（起始时间、终止时间、任务名称、时间间隔）生成数据报表。并且能够把生成的数据报表导出为 Excel 文件。

（7）通信模块

该模块是软件底层的模块，它负责直接与操作系统通信端口通信，读取通信端口收到的二进制数据并发送到数据帧校验与翻译模块。

（8）数据处理模块

该模块为基础模块，从通信端口通信模块收到二进制信息，并根据通信协议收到的数据是否正确与完整。忽略错误的数据，并把正确的数据分别发送到传感器列表显示与传感器列表显示，从而实现温度数据的实时显示。

（9）数据库模块

该模块为基础模块，从它的下一层，即数据帧校验与翻译模块提取数据并把对应的测点温度信息存储到数据库中。数据库模块为他的上层模块（历史曲线、历史曲线、数据导出模块）提供数据查询服务。

3.3 软件开发语言、环境和开发工具

本系统在软件开发上选择 C#语言和 Microsoft Visual Studio 2013 开发环境协同开发，在数据库方面，采用 MySQL 数据库管理系统进行数据的统一的存储于查询。

(1) C#语言

C#是一种最新的、面向对象的编程语言。他不但具有像 C++一样强大的功能，而且是基于.NET 平台上最佳的编程语言^[65]。它使得程序员可发挥.NET 平台的各种特性，从而快速开发出 Windows 平台上的应用程序。

(2) .NET 4.0

Microsoft .NET Framework 是用于 Windows 编程的框架模型^[66]。考虑到快速开发软件的网络通信功能的需要，选择了其中的.NET 4.0 编程框架以取得对 Windows XP 更好的兼容性。

(3) Microsoft Visual Studio 2013 集成开发环境

Microsoft Visual Studio 2013 是微软最新推出的一款集成开发环境（IDE）^[67]，他支持 C、C++、C#等编程语言，并且支持最新的.NET 4.5 程序开发框架。具有丰富的用户控件，因而具有出色的 windows 平台图形化程序开发能力。是基于 windows 平台的应用程序的最佳开发环境^[68]。

(4) MySQL 数据库管理系统

MySQL 是最为流行的关系型数据库管理系统，他是一款开源的免费软件^[69]。MySQL 代码体积小、速度快和易于集成的特点^[70]，非常适合类似于大体积混凝土监测系统这类数据采集软件的开发。并且，MySQL 搭配 PHP 和 Apache 可以很方便的开发基于 Web 的监测系统^[71]，从而使用户可以在任何能够上网的设备上访问数据。

3.4 功能模块的实现

功能模块包含传感器与任务设置模块、传感器列表显示模块、三维模型显示模块、历史曲线模块、温控参量模块、数据导出模块。他们的实现如下：

3.4.1 任务设置



图 3.2 任务设置

Fig. 3.2 Configuration

任务设置模块是在监测任务开始前配置好数据库、传感器信息和端口号。任务设置模块的界面如图 3.2 所示。模块包含了 4 个功能区，他们分别是服务器连接设置、任务配置文件设置、通信端口设置、传感器设置。其中服务器连接设置包含远程服务器连接和本地服务器连接，通过设置远程服务器的 IP 地址和端口号可以连接到远程服务器，通过设置本地 MySQL 数据库服务器的连接参数可以连接到本地服务器。其中任务配置文件设置可以载入某层混凝土的传感器配置文件，如图 3.3 所示，传感器配置文件包括传感器的通道、编号、位置信息。其中通信端口设置用来设置 ZigBee 协调器的端口，以便收集传感器上报的温度数据。其中传感器设置可以设置传感器的通道号和采样时间。

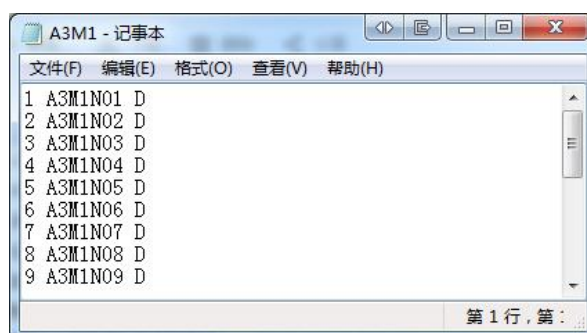


图 3.3 任务配置文件

Fig. 3.3 Task file

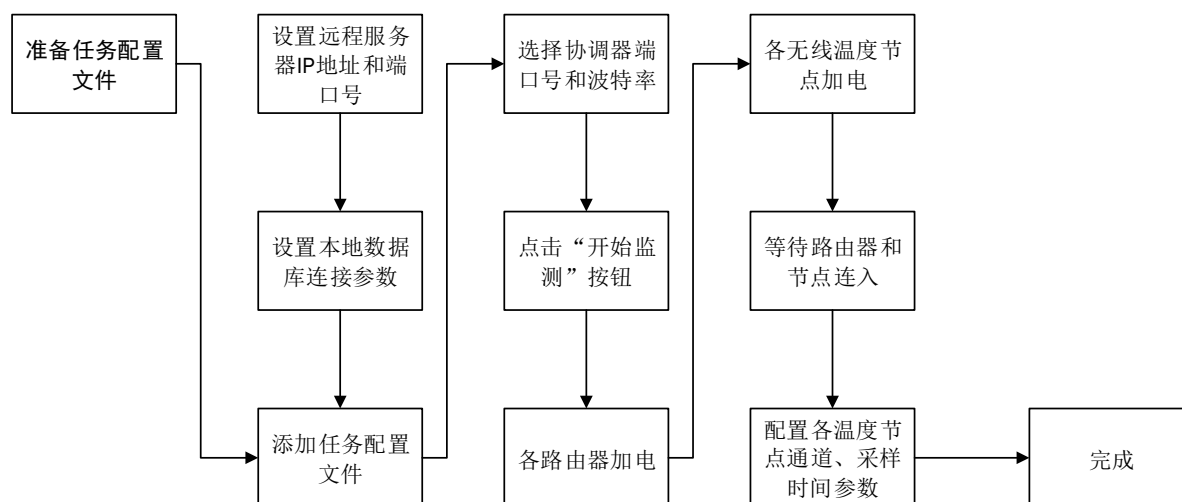


图 3.4 任务设置操作流程

Fig. 3.4 The workflow for task configuration

任务设置模块操作流程如图 3.4 所示。其工作流程为：1) 输入远程服务器的连接参数，点击连接。连接成功后状态栏会有提示“远程服务器连接成功”。2) 输入本地数据库的连接参数，点击连接。连接成功后状态栏会有提示“本地数据库连接成功”。3) 根据需要首先准备好任务配置文件，任务配置文件如图 3.3 所示。任务配置文件是 txt 文本文件格式，文件名是任务的名称（例如，A3M1），第一列是传感器的通道号，第二列是传感器的名称，第三列是传感器的位置。任务配置文件包含了该任务的所有传感器的集合，集合内传感器名称必须以任务名称开头（例如，A3M1XX）。4) 准备好任务配置文件之后，在任务设置模块里面添加任务配置文件，添加完成后在任务列表里出现该任务的名称。5) 选择协调器对应的端口号和波特率。6) 点击“开始监测”按钮，协调器的红色指示灯亮。7) 把路由器的电池由近及远依次装上，加电后，对应路由器的通道号会出现在传感器列表之内。8) 把无线温度节点的电池依次装上，加电后，对无线温度节点的通道号会出现在传感器列表之内。9) 如需配置路由器或者无线温度节点的采样时间或者通道号，可双击传感器列表之内的对应的通道号，片刻之后，对应节点的信息会自动上报。此时，输入需要配置的通道号和采样时间，点击写入配置。等待对应节点重启后即完成配置。

3.4.2 传感器列表显示



图 3.5 传感器列表显示

Fig. 3.5 Sensor list

传感器列表显示模块用于显示所有的传感器的状态信息。传感器列表模块的界面如图 3.5 所示。模块显示了当前连接到系统的所有传感器集合，包括了传感器的编号、温度、通道、电压和更新时间信息。并可以实时监测传感器的健康状态，当传感器的探头断开、电量不足、节点断开时能够实时预警，确保传感器工作正常。

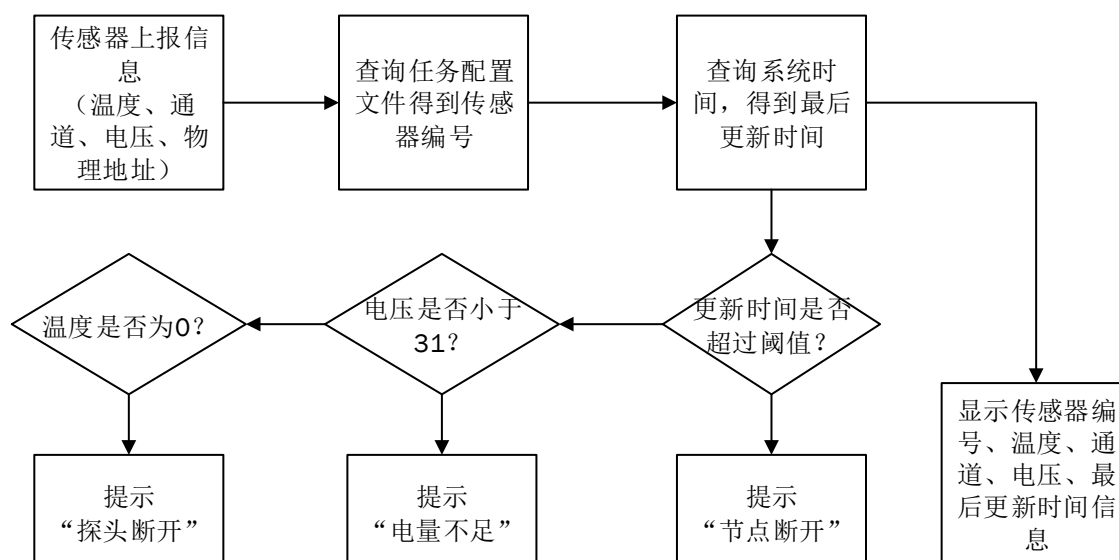


图 3.6 传感器列表显示模块流程图

Fig. 3.6 The workflow of sensor list

3.4.3 三维模型显示

图 3.7 三维模型显示

三维显示模块用于直观的显示温度信息。三维模型显示模块的界面如图 3.7 所示。模块能够载入对应任务的传感器测点图（支持 BMP、JPG、PNG 等图片格式），并把对应测点的温度直观显示到三维模型上。

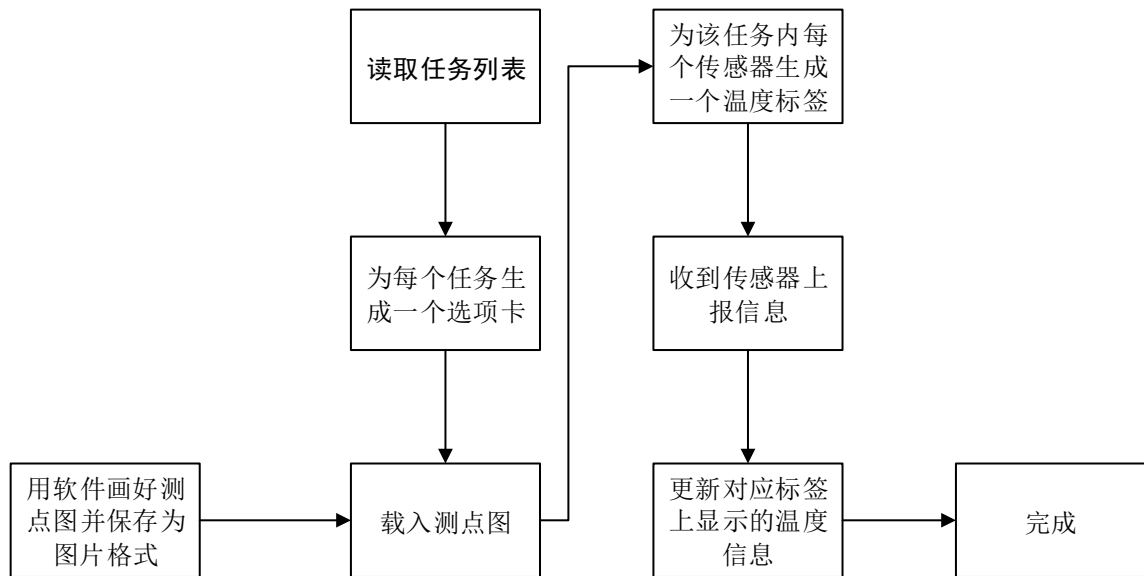


图 3.8 三维模型显示流程图

Fig. 3.8 The workflow of 3D vision

如图 3.8 所示，三维模型显示模块的工作流程为：三维模型显示模块根据任务设置模块里导入的任务列表，为每个任务生成单独的选项卡。用户用画图软件绘制好测点图保存为图片格式并载入到软件中。用户切换不同的项卡来查看不同任务的温度信息，多个任务相互不会形成干扰。模块根据任务设置文件里的传感器集合，为每个传感器生成一个温度标签，并显示在对应任务的测点图上。模块在收到传感器上报的信息之后，更新对应标签上显示的温度信息。这样便完成了温度在三维模型上的显示。

3.4.4 历史曲线

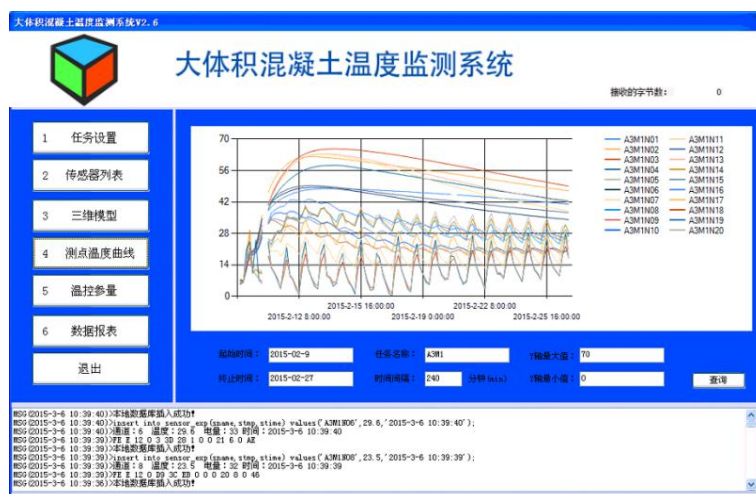


图 3.9 历史曲线

Fig. 3.9 Temperature history curve

历史曲线模块用于显示传感器温度历史信息。历史曲线模块的界面如图 3.9 所示。模块能够根据输入的查询条件（起始时间、终止时间、时间间隔、任务名称、Y 轴最大最小值）绘制对应温度监测任务的所有传感器温度曲线。

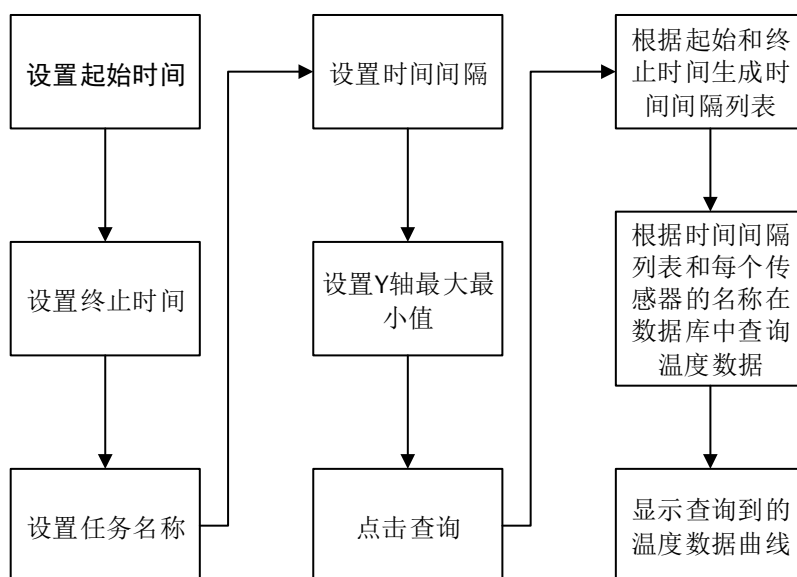


图 3.10 历史曲线模块流程图

Fig. 3.10 The workflow of temperature history curve

如图 3.10 所示，历史曲线模块工作流程为：1）用户设置查询的起始时间；2）用户设置查询的终止时间；3）用户填写对应的任务名称；4）用户填写时间间隔（时间间

隔越小,查询的结果越详细,但花费的时间越久;较大的时间间隔可以加快查询的速度);
 5) 用户设置 Y 轴最大和最小值; 6) 程序根据起始时间、终止时间和时间间隔生成所要查询的时间节点,并形成表格的第一列; 7) 根据第一列表格的时间节点和任务名里所含的传感器,逐一查询对应传感器该时间的温度数据; 8) 把查询结果以曲线的形式加以显示。

3.4.5 温控参量

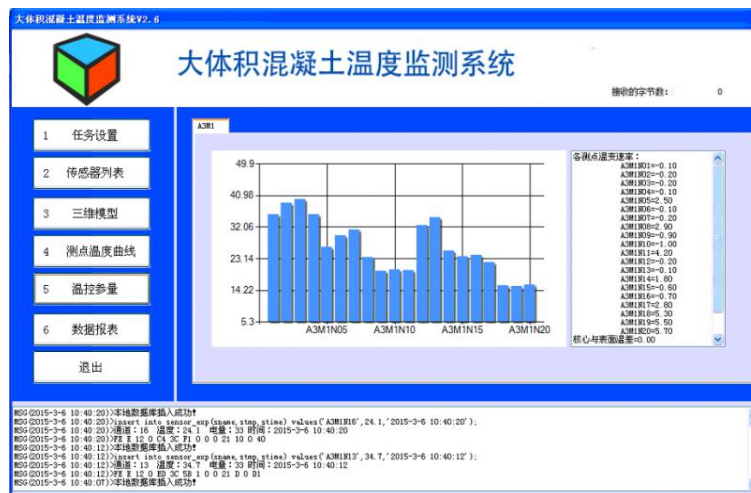


图 3.11 温控参量

Fig. 3.11 parameters

温控参量模块用于显示温差和降温速率等温控参量。温控参量模块的界面如图 3.11 所示。模块能够显示每个任务内所有传感器的温度柱形图,以方便判断温差。同时软件能够自动计算并显示各点的温变速率与核心表面温差。

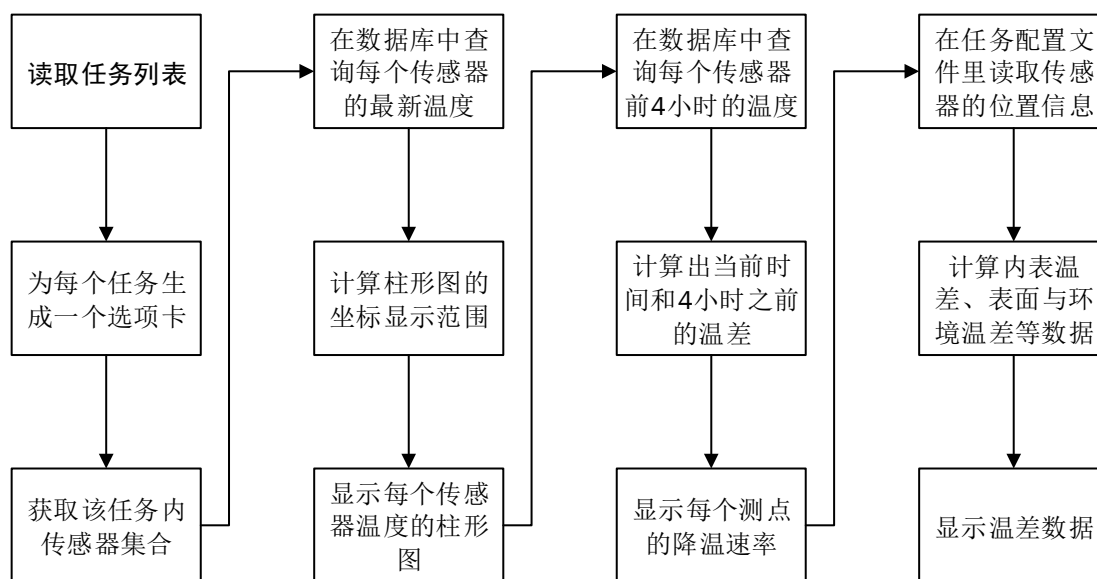


图 3.12 温控参量模块流程图

Fig. 3.12 The workflow of parameters monitoring module

温控参量模块的工作流程图如图 3.12 所示，其具体内容为：1) 软件读取任务列表，并为每个任务生成一个单独的选项卡，确保各个任务的温控参量能够独立显示互不影响；2) 对于每个任务，获取该任务内的每个传感器名称；3) 对于每个传感器名称，在数据库中查询传感器的最新温度；4) 根据传感器温度的最大最小值计算柱形图的坐标显示范围；5) 把查询到的传感器温度信息显示到柱形图上；6) 接下来，查询每个传感器前 4 小时的温度，并把最新温度减去查询到的 4 小时之前的温度得到温差；7) 把计算出的 4 小时温差显示到温控参量信息里；8) 读取任务配置文件里关于传感器的位置信息，根据传感器的位置信息，计算内表温差、表面与环境温差等数据；9) 把计算出的温差数据显示到温控参量信息里。

3.4.6 数据导出

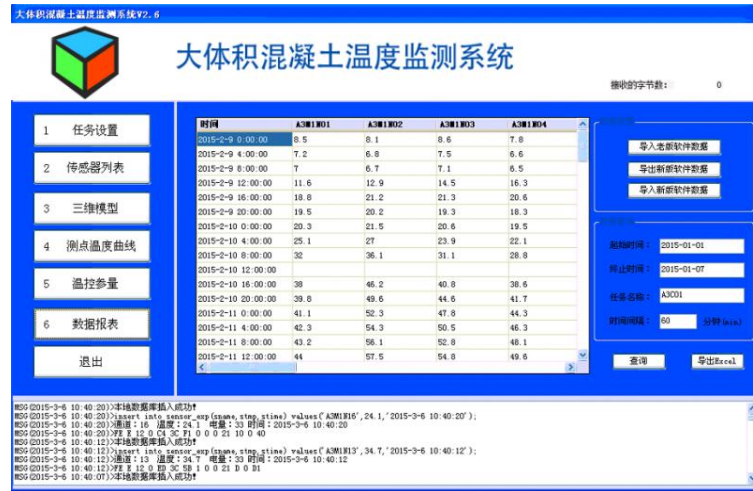


图 3.13 数据导出

Fig. 3.13 Data export

数据导出模块用于显示数据报表并导出到 Excel 文件。界面如图 3.13 所示。模块能够根据查询条件（起始时间、终止时间、任务名称、时间间隔）生成数据报表。并且能够把生成的数据报表导出为 Excel 文件。为了数据迁移的需要，软件支持导入和导出数据。

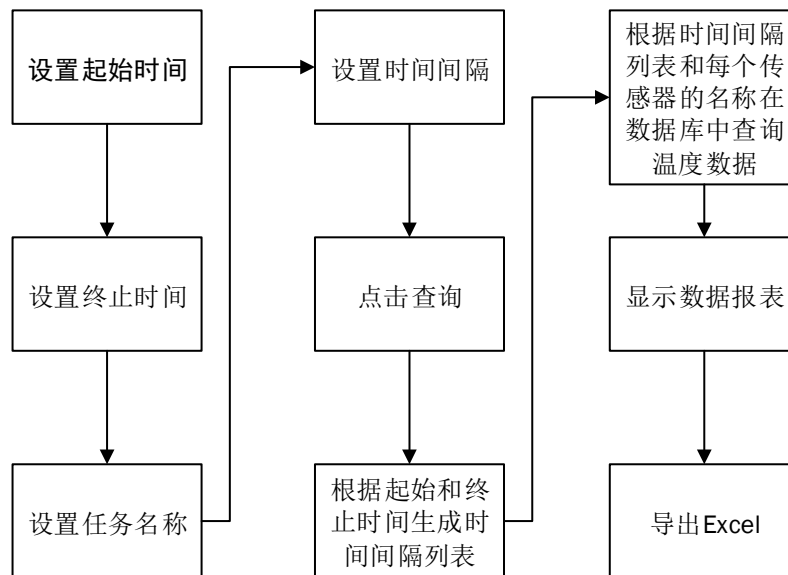


图 3.14 数据导出模块流程图

Fig. 3.14 The workflow of data export

数据导出模块的工作流程图如图 3.14 所示，其具体内容为：1) 用户设置起始时间；2) 用户设置终止时间；3) 用户设置任务名称；4) 用户设置时间间隔；5) 用户点击查询；6) 软件根据起始时间和终止时间生成需要查询的时间节点；7) 根据需要查询的时间节点和任务里对应的传感器名称查询对应的温度数据；8) 在表格里显示查询到的数据；9) 用户把查询到的温度数据导出到 Excel 文件中。

3.5 基础支持模块的实现

基础支持模块包含通信模块、数据帧校验与翻译模块和数据库模块。基础支持模块与功能模块的关系如图 3.15 所示。

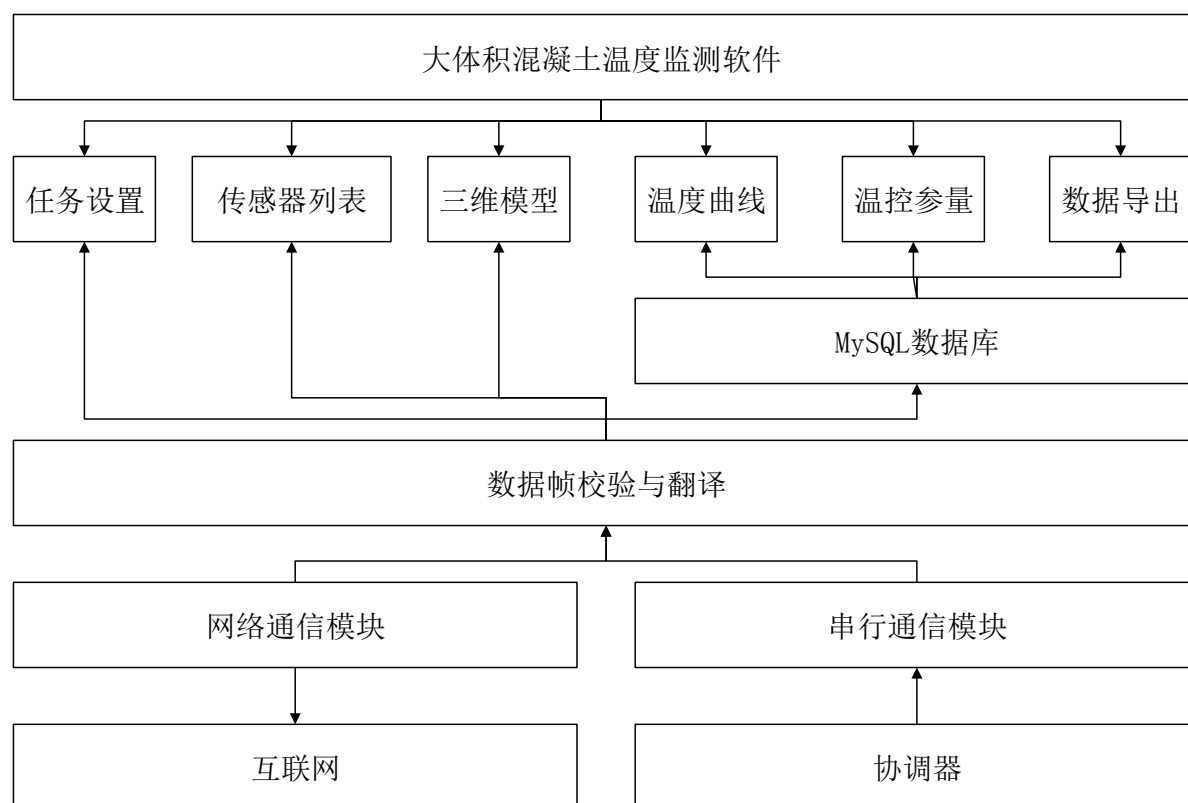


图 3.15 软件基础支持模块框图

Fig. 3.15 The framework for the kernel module

3.5.1 通信模块

通信模块是监测系统的核心部分。通信模块包含串行通信模块和网络通信模块。串口通信模块负责从串行通信端口读取传感器上报的温度信息，把上报的温度信息发送给数据帧校验与翻译模块；或把传感器的配置信息通过串行端口发送给指定传感器。网络通信模块负责通过网络把数据发送到远程服务器上。

(1) 串行通信模块

所谓的串行通信就是通过串行接口把数据一位一位地发送或接收，由于标准制定的较早，实现简单以及通用性强，在传感领域广泛使用串行通信。微软的.Net 平台下很好的对串行通信进行了支持，使得编程较为容易。

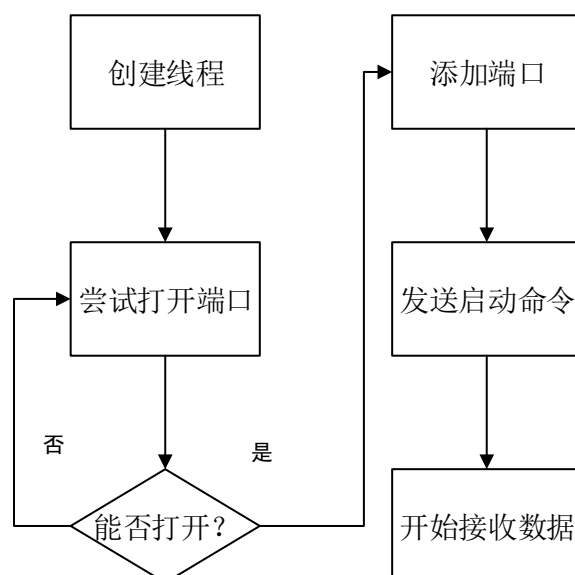


图 3.16 串行模块流程图

Fig. 3.16 The workflow for serial port module

如图 3.16 所示，首先创建新的线程，尝试打开端口，如果能够打开则表示该端口可用。把能打开的端口添加到可用端口列表中。当用户按下开始监测按钮之后，发送启动命令，此时整个系统就绪，开始侦听端口并从端口接收数据。串行通信模块的源代码如图 3.17 所示。

```
System.Threading.Thread ComportCheck = new System.Threading.Thread(delegate()  
{  
txt_status.Text = "检测可用的串口, 请稍等..." + Environment.NewLine + txt_status.Text;  
for (int i = 0; i < 256; i++)  
{  
    try  
    {  
        SerialPort sp = new SerialPort("COM" + (i + 1).ToString());  
        sp.Open();  
        sp.Close();  
        cbxCOMPort.Items.Add("COM" + (i + 1).ToString());  
        MSG("发现可用端口: " + "COM" + (i + 1).ToString());  
    }  
    catch (Exception)  
    {  
        continue;  
    }  
}  
});  
ComportCheck.IsBackground = true;  
ComportCheck.Start();if (!isOpen)  
{  
sp = new SerialPort();  
sp.PortName = cbxCOMPort.Text.Trim();//设置串口名  
sp.BaudRate = Convert.ToInt32(cmbBraudRate.Text.Trim()); //设置串口的波特率  
sp.StopBits = StopBits.One;  
sp.DataBits = 8;  
sp.Parity = Parity.None;  
sp.ReadTimeout = -1;  
  
    sp.Open();  
    isOpen = true;  
    //启动命令  
    Byte[] b = new Byte[6];  
    b[0] = 0xFE;  
    b[1] = 0x06;  
    b[2] = 0x11;  
    b[3] = 0x00;  
    b[4] = 0x01;  
    b[5] = 0x16;  
    sp.Write(b, 0, 6);  
    isOpen = true;  
}  
}
```

图 3.17 串行通信模块源程序

Fig. 3.17 The source code for serial port module

(2) 网络通信模块

网络通信模块负责把现场监测主机的数据通过互联网发送到远程监测主机上。该模块通过.NET 包含的 `TcpClient` 组件完成。

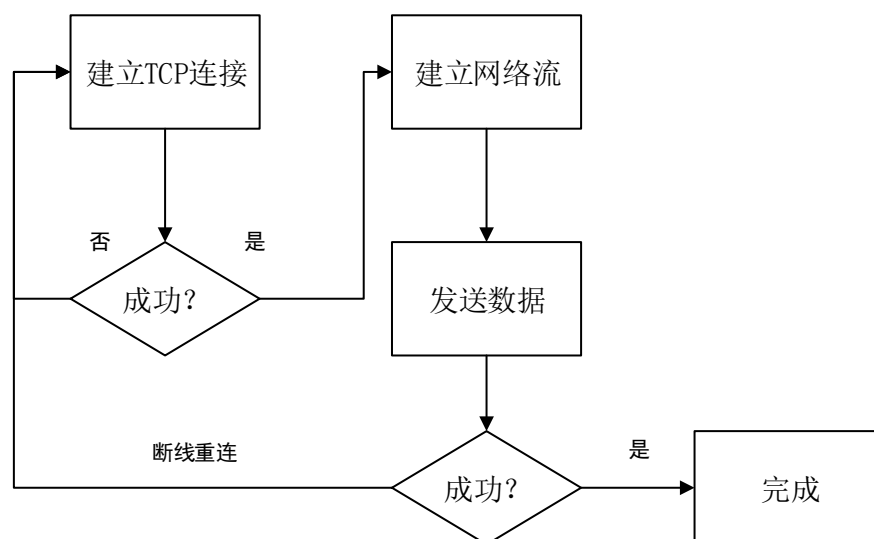


图 3.18 网络通信模块

Fig. 3.18 Internet communication module

如图 3.18 所示，模块首先根据用户输入的远程服务器地址尝试建立 TCP 链接，如果建立成功，进一步建立网络流。如果网络通信模块收到数据的话，这把数据打包成为网络数据帧通过网络流发送到远程服务器上。网络通信模块的源程序如图 3.19 所示。


```
        if (!isConnected)
        {
                                myclient =
new TcpClient(textBox1.Text, Convert.ToInt32(textBox2.Text));
                                networkStream = myclient.GetStream();
                                MSG("远程服务器连接成功!");
                                isConnected = true;
        }
        else
        {
                                MSG("远程服务器连接失败!");
        }
    if (isConnected)
    {
        try
        {
            byte[] Message =
StructToBytes(new Operator(sname, stmp, stime)); // 将结构转换成字节数组
            networkStream.Write(Message, 0, Message.Length);
            MSG("远程数据库插入成功!");
        }
        catch (Exception)
        {
            //断线重连!!!
            MSG("远程数据库插入失败!");
            MSG("重新连接远程数据库。。。");

                                myclient =
new TcpClient(textBox1.Text, Convert.ToInt32(textBox2.Text));
                                networkStream = myclient.GetStream();
                                MSG("远程服务器连接成功!");
                                isConnected = true;
        }
    }
}
```

图 3.19 网络通信模块源程序

Fig. 3.19 The source code for internet communication module

3.5.2 数据帧校验与翻译模块

数据帧校验与翻译模块包含 `check_hash_code` 和 `DataframTrans` 函数。`check_hash_code` 函数检查接收到的数据帧是否正确。根据 2.4.4 节对于通信协议的规定，数据帧最后一位为校验位，该函数通过把前 $n-1$ 位相加得到的值和校验位与第 n 位校验位对比并返回结果。`DataframTrans` 函数把检查无误的数据帧按照通信协议进行翻译，分别获取数据帧长度、物理地址、温度、电压、编号等信息并存储到 `Data` 数据结构里返回供相关模块调用。数据帧校验与翻译模块的源程序如图 3.20 所示。

```
bool check_hash_code(Byte hash) {
    hash = 0x00;
    for (int k = 0; k < len - 1; k++) {
        hash += buffer[k];
    }
    if (buffer[len - 1] == hash)
        return true;
    else
        return false
}

Data DataframTrans(Byte[] buffer)    {
    Data myData = new Data();
    myData.len = Convert.ToInt32(buffer[1]);
    myData.AddH = buffer[4];
    myData.AddL = buffer[5];
    Byte[] temp = new Byte[2];
    temp[0] = buffer[6];
    temp[1] = buffer[7];
    double mytemp = Convert.ToDouble(BitConverter.ToInt16(temp, 0)) /
10;

    myData.temperature = mytemp;
    myData.battery = Convert.ToChar(buffer[10]);
    temp[0] = buffer[11];
    temp[1] = buffer[12];
    myData.serialNumber = BitConverter.ToUInt16(temp, 0);
    myData.lastUpdateTime = DateTime.Now;
    return myData;
}
```

图 3.20 数据帧校验与翻译模块源程序

Fig. 3.20 The source code of data frame check and translate

3.5.3 数据库模块

(1) 数据库的设计

为了向功能模块提供数据服务为，以求更高效的导入和查询数据，根据大体积混凝土温度监测的实际需要，设计了以下数据表。

表 3.1 传感器信息表

Tab. 3.1 Table for sensor information

列名	数据类型	长度	备注	实际含义
sname	Varchar	10	Primary key	名称
stmp	Double	-	Primary key	温度
stime	Datetime	-	Primary key	时间

参照表 3.1 通过数据库的 DDL 语言建立数据库和数据表，如图 3.21 所示。

```
create database sensordb;
use sensordb;
SET character_set_client = utf8 ;
SET character_set_connection = utf8 ;
SET character_set_database = utf8 ;
SET character_set_results = utf8 ;
SET character_set_server = utf8 ;
SET character_set_client = utf8;
SET character_set_results = utf8;

drop table if exists sensor_exp ;
create table sensor_exp(
    sname varchar(100),
    stmp double,
    stime datetime,
    primary key (sname,stime)
);
describe sensor_exp;
```

图 3.21 建立数据库

Fig. 3.21 Database creation

(2) 软件和数据库的通信

软件和数据库的通信包括两部分，分别是把协调器发送给软件的传感器信息整理以后发送给数据库以及根据相应条件来从数据库中查询信息。send_to_db 函数负责把数据帧翻译模块准备好的有关传感器名称、温度、时间的数据存储到数据库中。

find_in_db 函数根据传感器名称和时间来查找对应的温度数据。图 3.22 所示的是软件与数据库交互的主要代码：

```
void send_to_db(string sname,double stmp,string stime)
{
    if (ismySQLconnected)
    {
        string query = "insert into sensor_exp(sname,stmp,stime)
values('" + sname + "','" + stmp + "','" + stime + "');"
        MSG(query);
        MySqlCommand mycmd = new MySqlCommand(query, mycon);
        if (mycmd.ExecuteNonQuery() > 0)
        {
            MSG("本地数据库插入成功！");
        }
        else
        {
            MSG("本地数据库插入失败！");
        }
    }
}

double find_in_db(string sname,string stime)
{
    string query = "select stmp from sensor_exp
where sname='" + sname + "' stime='"+stime+" '
order by stime desc limit 0,1;";
    MySqlCommand mycmd = new MySqlCommand(query, mycon);
    MySqlDataReader reader = mycmd.ExecuteReader();
    reader.Read();
    if (reader.HasRows)
    {
        dataGridView1.Rows[i].Cells[dataGridView1.Columns.Count
- 1].Value = reader.GetDouble(0);
    }
    reader.Close();
}
```

图 3.22 数据库交互源代码

Fig. 3.22 Source code for database communication

3.6 本章小结

本章在针对大体积混凝土温度监测系统需求分析的基础上，采用 Microsoft Visual Studio 2013 集成开发环境和 MySQL 数据库设计并开发了大体积混凝土温度监测软件。首先进行了软件模块的设计，从提出的各项需求中剥离出了任务设置、传感器列表显示、三维模型显示、历史曲线、温控参量、数据导出等各项功能。任务设置模块实现了数据库设置、任务设置、通信设置、传感器设置；传感器列表模块实现了传感器编号显示、温度显示、通道显示、电压显示、时间显示和故障诊断；三维模型模块实现了温度测点在三维模型上的直接显示；温度曲线模块实现了根据起始时间、终止时间、时间间隔、任务名称来绘制多个温度测点的历史曲线；温控参量模块实现了各任务、各测点的温度柱形图显示、温变速率和测点温差的显示；数据导出模块实现了数据导入和导出等各项功能。接下来，详细地对该部分所涉及到的模块的实现进行了阐述，并提供了关键的源程序代码。最后，进一步对基础模块，如通信模块、数据帧校验与翻译模块和数据库模块的实现进行了详细的阐述。

本章实现的大体积混凝土温度监测软件对上报的温度信息进行统一的管理与分析，实现了大体积混凝土施工监测多任务管理、传感器信息显示与故障诊断报警、大体积混凝土温度三维模型显示、测点温度历史曲线显示、温控参量显示、数据查询与导出等功能。

4 工程应用

本章通过大体积混凝土模型实验温控监测、某大桥承台锚碇大体积混凝土温控监测两个实际工程项目，进一步验证大体积混凝土无线温度监测系统的各项功能。

4.1 大体积混凝土模型实验温控监测

4.1.1 工程概况

试验模型具体尺寸为 $6\text{m}\times 8\text{m}\times 3\text{m}$ ，混凝土强度等级为C45P10，基础底板钢筋布置情况，按照如下进行布置：上下皮的钢筋均为双层双向 $\Phi 25@100\text{mm}$ ，II级钢，上层钢筋的保护层厚度为 25mm ，下层钢筋的保护层厚度为 40mm 。垫层采用C20素混凝土，厚度为 150mm 。具体情况详见图 4.1。

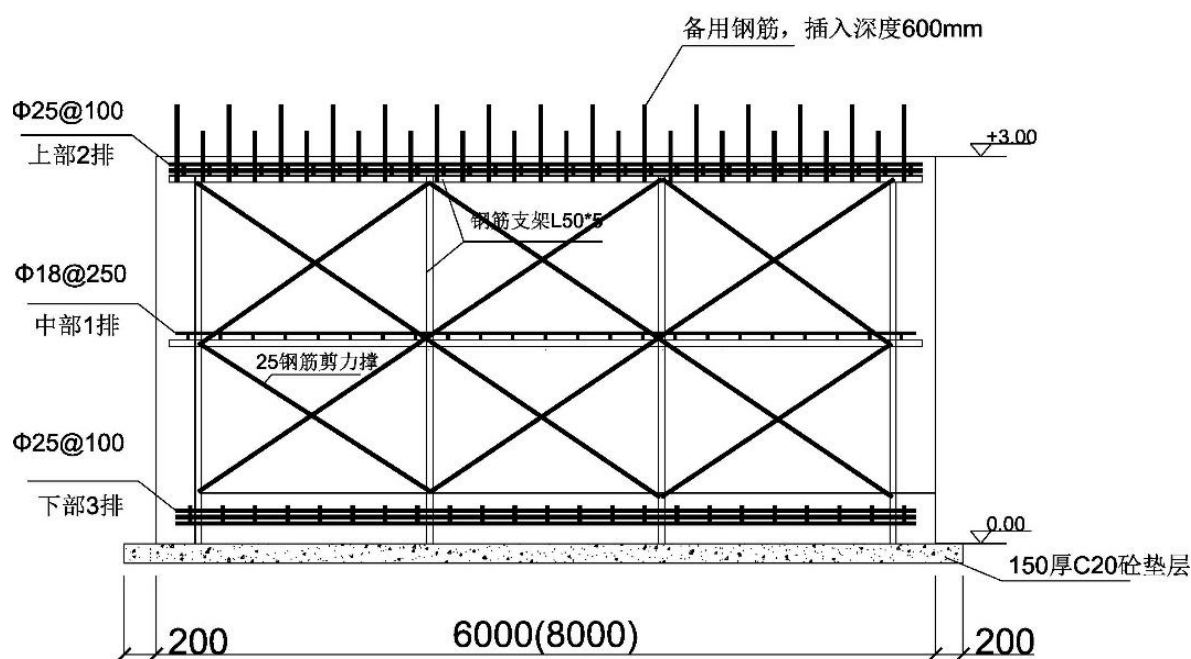


图 4.1 大体积混凝土结构剖面图

Fig. 4.1 Layout for mass concrete

4.1.2 测点布设

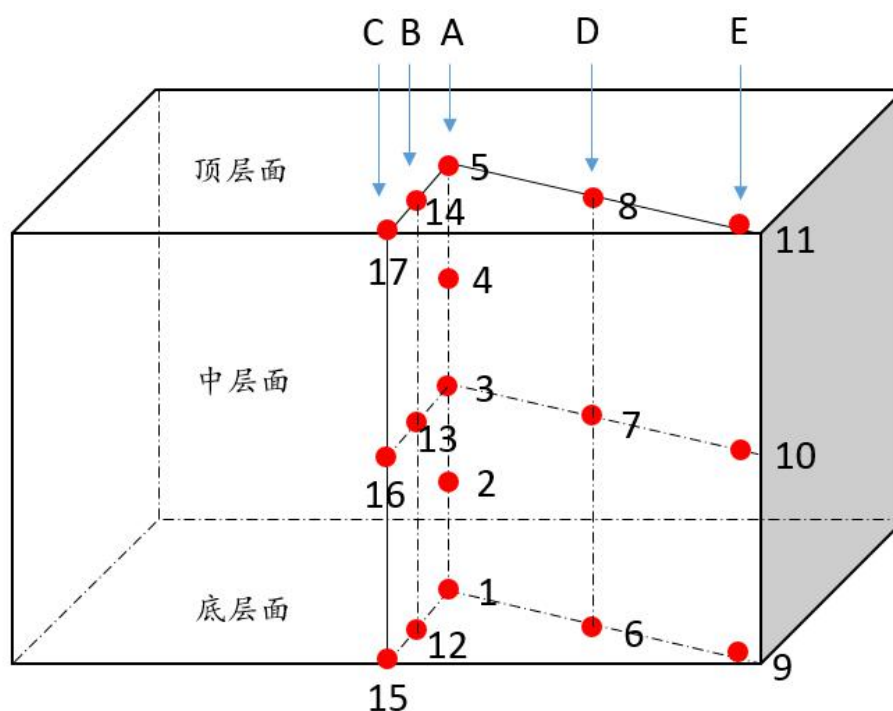


图 4.2 测点布设图

Fig. 4.2 Sensor deployment

根据对大体积混凝土的模拟,并考虑到结构的对称性特征,确定了监测布点,图 4.2 所示。测点布置主要分为“5 轴 3 层”,即竖向 5 个轴线 A、B、C、D、E,水平向分为三层顶层面、中层面和底层面。因 A 轴应变变化梯度较大,故在 A 轴加布两个测点 2 和 4。每个测点分别布置一个无线温度传感器和一个光纤光栅温度传感器。温度测点数为 17 个,传感器为 34 个。现场布置图如图 4.3~图 4.8 所示。



图 4.3 施工现场图

Fig. 4.3 The construction site



图 4.4 现场监控系统

Fig. 4.4 On-site monitoring system



图 4.5 光纤传感器布设图

Fig. 4.5 FBG temperature sensor



图 4.6 无线温度传感器布设

Fig. 4.6 Wireless temperature sensing node



图 4.7 混凝土浇筑

Fig. 4.7 Concrete casting



图 4.8 混凝土浇筑

Fig. 4.8 Concrete casting

4.1.3 数据采集与分析

本次大体积混凝土模型实验全程采用大体积混凝土无线温度监测系统来进行温度监测，监测历时 31 天。监测系统绘制出的温度历史曲线如图 4.9 所示，查询得到的温度数据如图 4.10 所示。把数据导出为 Excel 进一步分析，得出如图 4.11~图 4.13 所示的中心温度变化曲线、表面温度变化曲线和环境温度变化曲线。

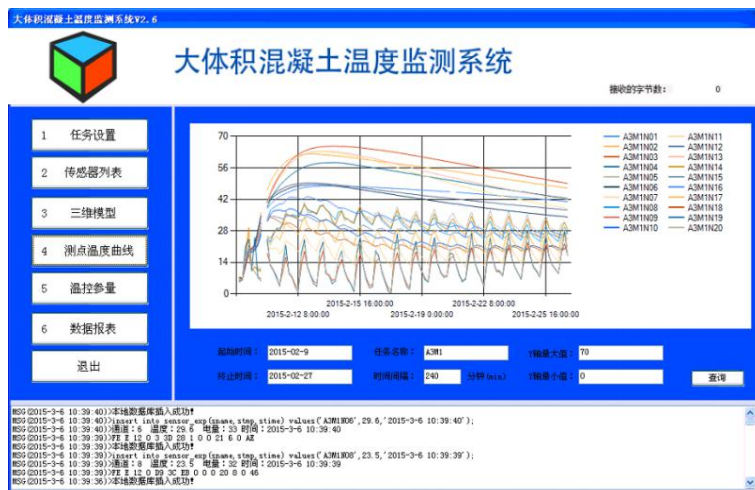


图 4.9 历史曲线

Fig. 4.9 Temperature history curve

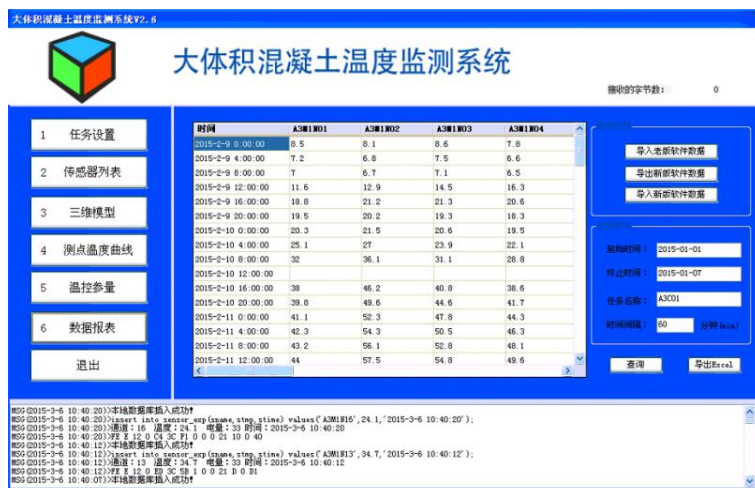


图 4.10 数据导出

Fig. 4.10 Data export

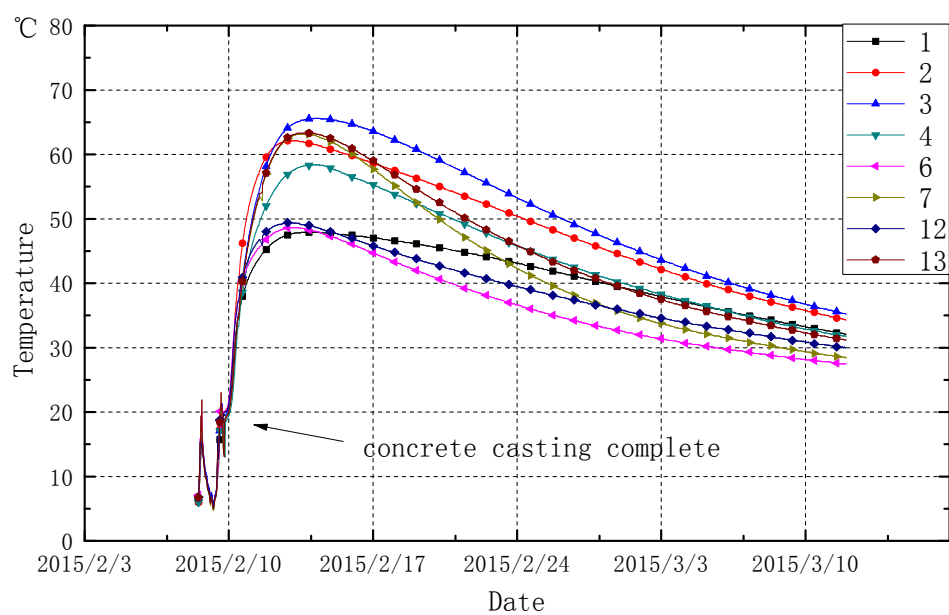


图 4.11 中心温度变化曲线

Fig. 4.11 Temperature history of inner sensors

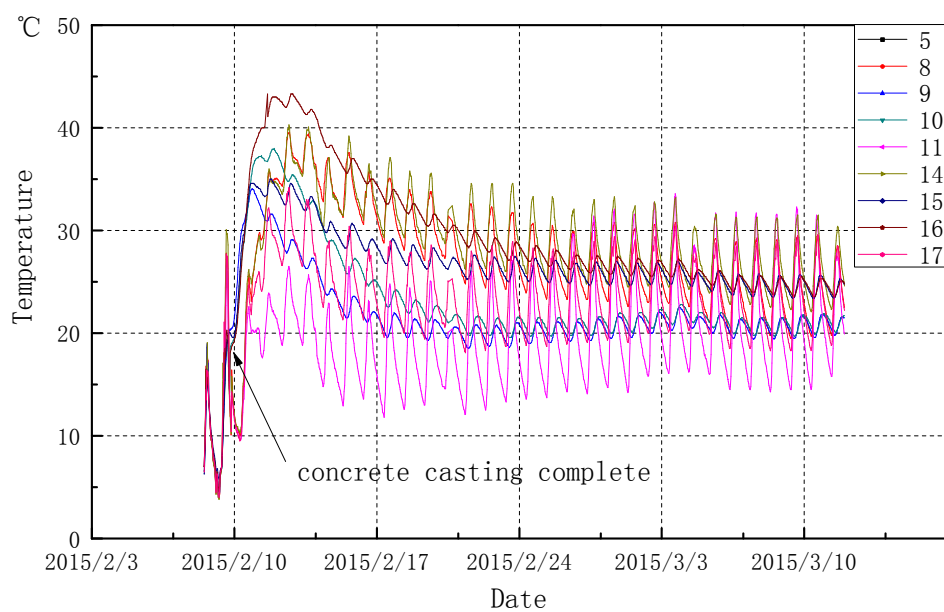


图 4.12 表面温度变化曲线

Fig. 4.12 Surface temperature history of surface sensors

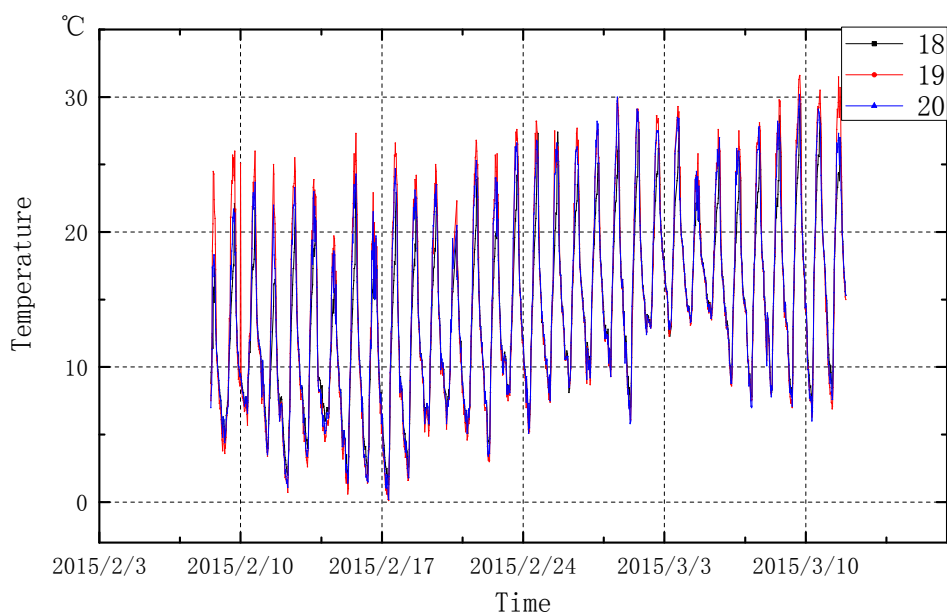


图 4.13 环境温度变化曲线

Fig. 4.13 Temperature history for environment sensors

4.1.4 监测过程与结果

(1) 温度监测系统架设工作于 2015 年 2 月 7 日开始进行, 于 2015 年 2 月 8 日全部结束。所有传感器工作正常, 监测系统开始采集数据。

(2) 混凝土浇筑开始于 2015 年 2 月 9 日下午 3:00 开始, 于 2015 年 2 月 9 日晚 8:00 结束, 历时 5 个小时。

(3) 在混凝土浇筑结束之后, 开始升温, 经历 115 个小时后在 2015 年 2 月 14 日凌晨 3 点达到最高温度, 其中 03 号测点最高温度达到 65.6 摄氏度。

(4) 工程所处环境昼夜温差较大 (可达 20 摄氏度), 受环境温度影响, 表面测点在降温阶段温度曲线呈现波动下降趋势。表面点温度在 24 小时内变化可达到 10 摄氏度。可以考虑增强保温措施。

(5) 截至到 2015 年 3 月 13 日, 共监测 31 天, 核心温度为 35.2 摄氏度, 表面温度为 24.5 摄氏度, 核心表面温差为 10.7 摄氏度。大体积混凝土温度呈现平稳下降趋势。目前系统运行稳定, 还在继续监测, 预期监测时间为 90 天。

4.2 某大桥承台锚碇大体积混凝土温控监测

4.2.1 工程概况

某悬索桥索塔承台其平面尺寸为 $23.5\text{m} \times 30\text{m} \times 8.0\text{m}$ ，每侧承台上设一独立塔座厚度为 2.0m ，塔座顶面纵横向尺寸为 $15.5\text{m} \times 22.35\text{m}$ ，底面纵横尺寸为 $19.5\text{m} \times 26.35\text{m}$ ；系梁宽 10.0m ，混凝土方量达到 13300m^3 ，混凝土设计强度为 C35，是典型的大体积混凝土。承台先浇筑右幅，再浇筑左幅，最后浇筑系梁，每幅分 3 层浇筑。承台左幅最先开始施工，第一层尺寸为 $23.5\text{m} \times 30.0\text{m} \times 2.2\text{m}$ ，外加 2.5m 倒角和 3.5m 系梁。

4.2.2 测点布设

根据《大体积混凝土施工规范》（GB 50496-2009）要求，选取中心温度、表面温度为监测参量，在此基础上，由软件自动计算内外温差、降温速率等温控参量。考虑到结构的对称性，选择在上混凝土中下层、XYZ 轴向布设了 13 个无线温度测点，传感器布设位置及编号如图 4.14 所示，其中 M2 点和 Z5 点是冗余点。除此之外，在冷却水管进出水口增设温度测点。同时布设温度测点监测环境温度变化。布设时，温度探头绑扎在钢筋上，直接插入到待测位置。为了方便无线发射模块二次利用，无线发射模块的天线外露至混凝土浇筑高度上 1 米，布设过程见图 4.15 所示。

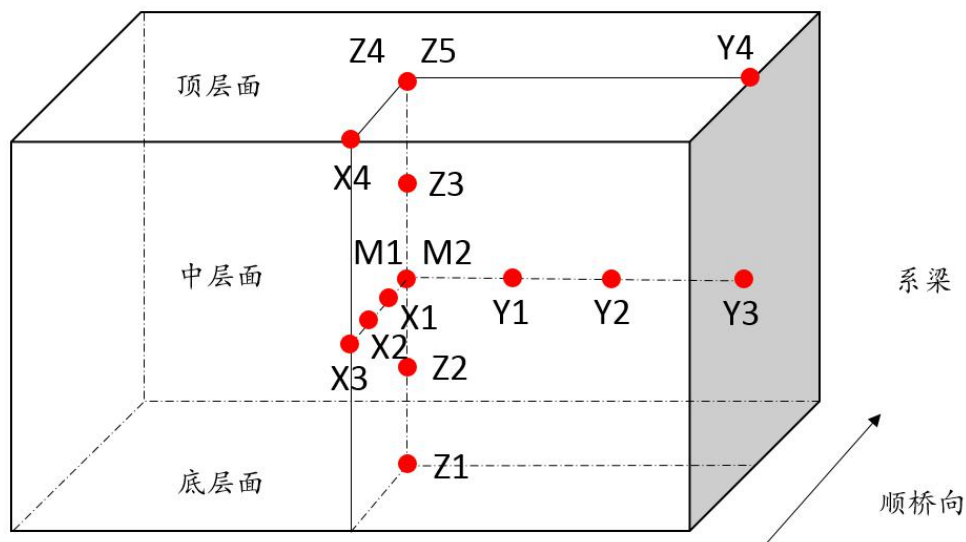


图 4.14 测点位置与编号

Fig. 4.14 Sensing position and Number



图 4.15 测点布设

Fig. 4.15 Sensor Deployment



图 4.16 浇筑后情况

Fig. 4.16 After concrete casting



图 4.17 保温措施

Fig. 4.17 Heat preservation measurement



图 4.18 凿毛后洒水养护

Fig. 4.18 Sprinkler maintenance



图 4.19 拆模后承台中心部位

Fig. 4.19 Central place after removal of the template



图 4.20 拆模后承台靠近系梁部位

Fig. 4.20 Tie beam place after removal of the template

4.2.3 数据采集与分析

2014 年 5 月 20 日承台左幅第一层完成钢筋绑扎及传感器布设工作，于 5 月 22 晚 21:00 开始浇筑工作，至次日下午 17:00 完成浇筑。截至到 5 月 29 日一共 168h 的温度监测数据如图 4.21~图 4.25 所示。

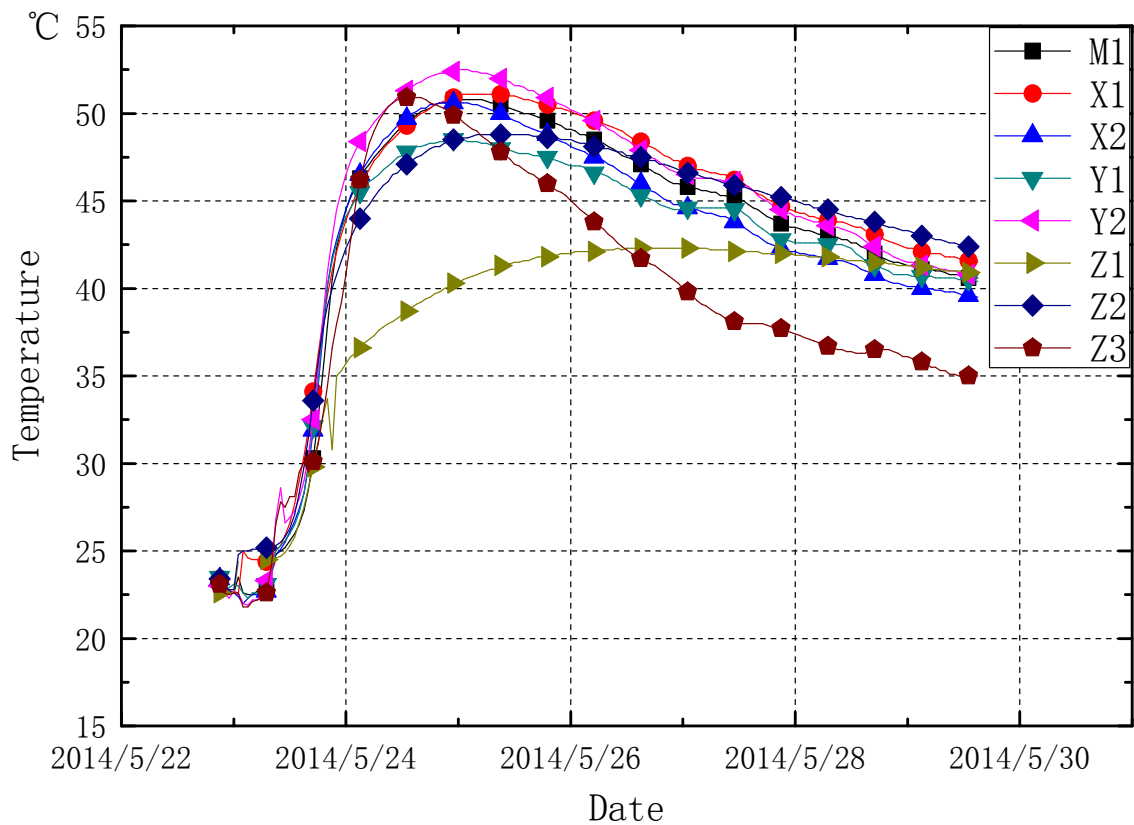


图 4.21 中心层测点温度发展曲线

Fig. 4.21 Temperature history for inner sensors

分析中心层测点温度发展曲线可以得到如下规律：

(1) 下层混凝土由于夜间浇筑，入模温度和环境温度较低，并且靠近垫层散热较快，入模后温度上升很慢。Z2 点（距垫层 0.5m 位置）入模约 12 小时后温度随上层混凝土一起快速上升，约 44 小时后接近温峰 49℃。Z1 点（距垫层 5cm 位置）由于靠近垫层散热较快，温度始终保持缓慢上升，约 3d 后达到温峰 42.3℃。

(2) 中心层混凝土由于浇筑正值午间, 入模温度和环境温度都相对较高, 并且受下层混凝土加热效果, 入模后很快(约 4h) 开始水化温升, 约 8h 后温度进入快速上升阶段。中心层混凝土在入模 8h~16h 内温度集中升高, 温升速率约 $1^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。约 16h 后温升速率减缓, 温度缓慢上升, 约入模后 40h 达到温峰(不同点峰值不同, 约在 $48.5\sim 52.5^{\circ}\text{C}$ 之间)。

(3) 入模温度较高的测点(Y2) 相对于入模温度较低的测点, 具有水化放热速度快、温升速率大等特点。所以应该对入模温度进行最大程度的控制, 在满足温控标准的基础上, 尽可能降低入模温度。选择较低的入模温度可以大大降低后期温度控制的压力。

(4) 温度最高点并未发生在中心部位, 而是在距离水管入水口距离较远处, 可见水管对混凝土的降温效果明显。同时提醒我们控制内表温差时, 不能仅监测中心点温度, 而需多布设一些传感器找出内部温度最高点。

(5) 温峰过后, 通过合理控制流速, 逐渐减小通水流量, 混凝土内部降温速率可以控制在 $2\sim 3^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。

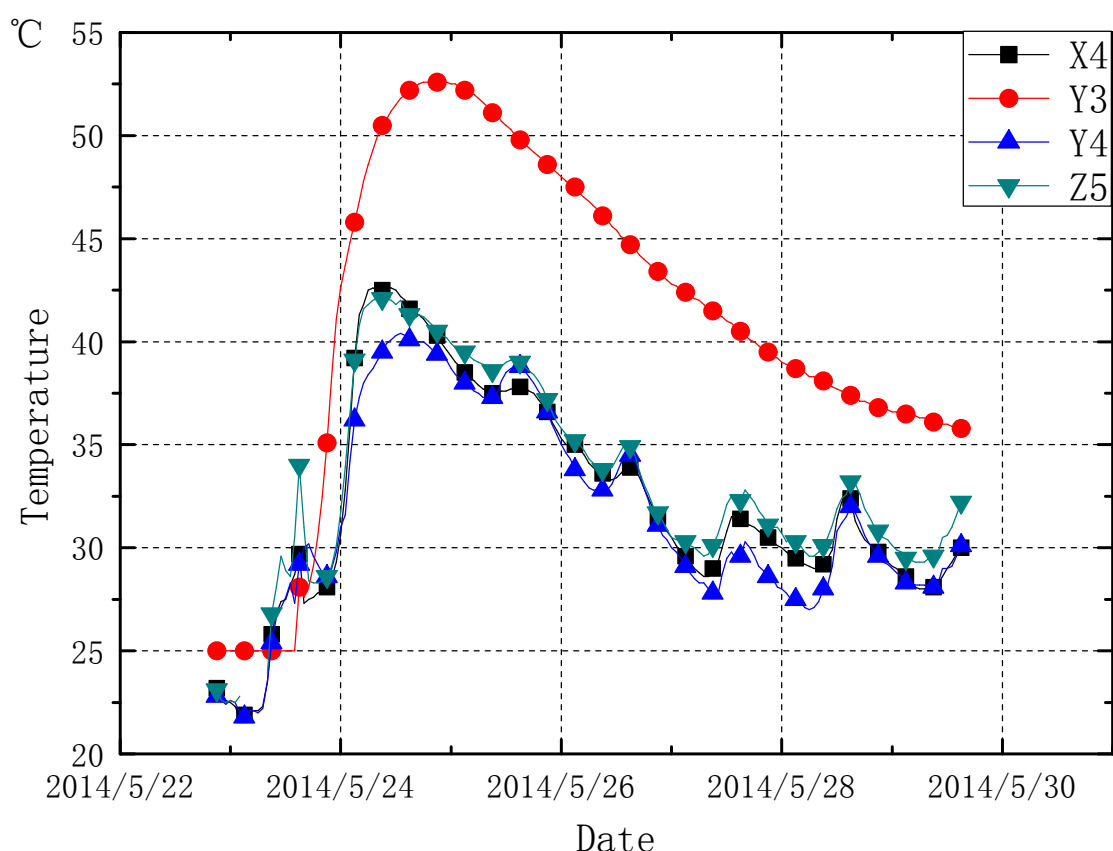


图 4.22 表面层测点温度发展曲线

Fig. 4.22 Temperature history curve for surface sensors

分析表面层测点温度发展曲线可以得到如下规律：

(1) 施工至表层混凝土时，入模温度和环境温度相对较高，并且由于下层混凝土加热效果，入模后约 4h 即进入快速温升阶段，入模约 12 小时后达到温峰（约 42℃）。这一特点对于里表控有好处，故在浇筑时间的选择上，应尽量选择在某日傍晚开始进行，在中午温度较高前完成混凝土中下部的浇筑工作，而在温度较高的午间完成表最后面混凝土的浇筑。

(2) Y4 测点外侧为木模板，认为木模版保温效果较好而未在模板外喷涂保温材料。实际测试结果证明，为达到较好的表面保温效果，即使木模版也需在侧面施加保温措施。

(3) 表面点在温峰过后的夜间温度会快速下降，造成内表温差增大。故要提前准备热水或减缓通水流速升高出水口水温，一旦表面点温度开始下降立刻补充热水蓄在顶面进行保温。

(4) 表面点温度变化受环境温度影响，午间升温，夜晚降温。

(5) 温度下降阶段，表面温度平均温度下降速率很快，很难控制，故在降温阶段更要做好温度监测工作与表面保温工作。

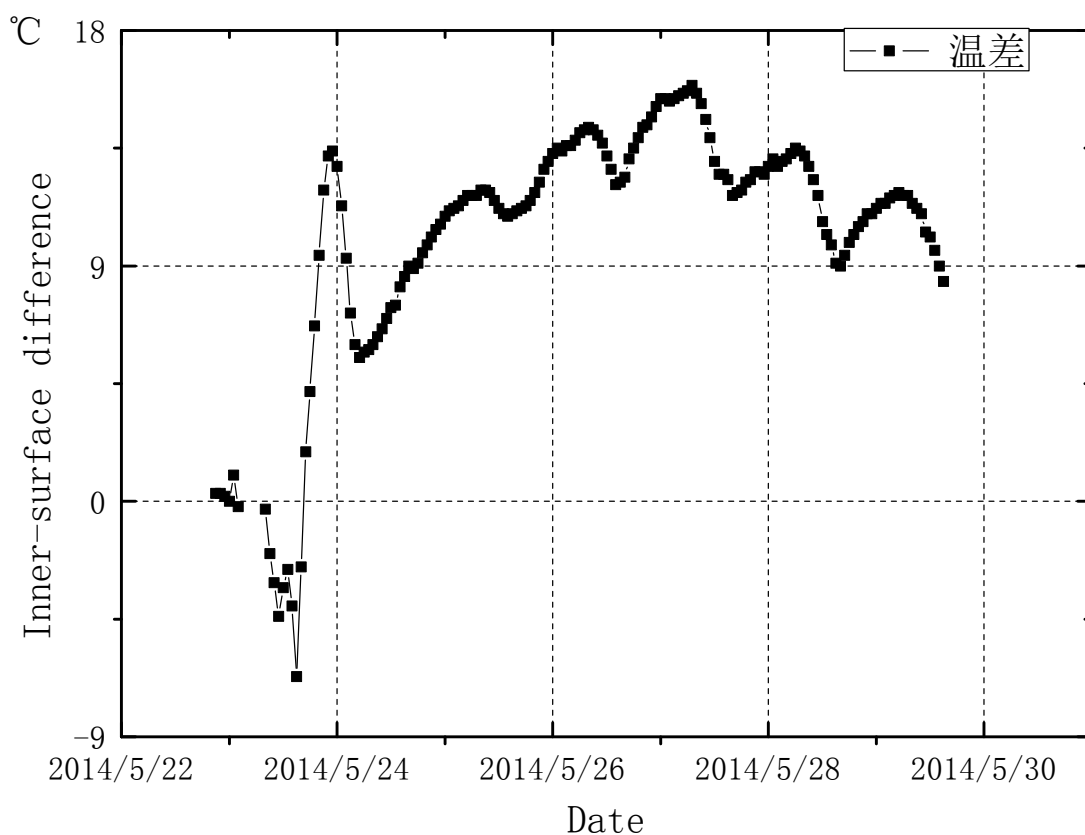


图 4.23 内表温差发展曲线

Fig. 4.23 Temperature history curve for inner-surface temperature differentials

分析内表温差变化曲线，可以得出以下规律：

(1) 前期温升阶段，由于底层和中间层混凝土先浇筑开始水化放热，而表面混凝土后浇筑并且散热快，混凝土内外温差逐渐增大，约表面层浇筑 10 小时后里表温差达到最大值（约 16℃）。故在顶面混凝土浇筑完成后，要快速将温热水蓄至混凝土表面进行保温，以减少内表温差。

(2) 由于表面温度会随环境温度变化，白天高晚上低，内表差受环境变化影响明显，尤其应注意降温阶段夜晚的气温较低时里表温差的控制。

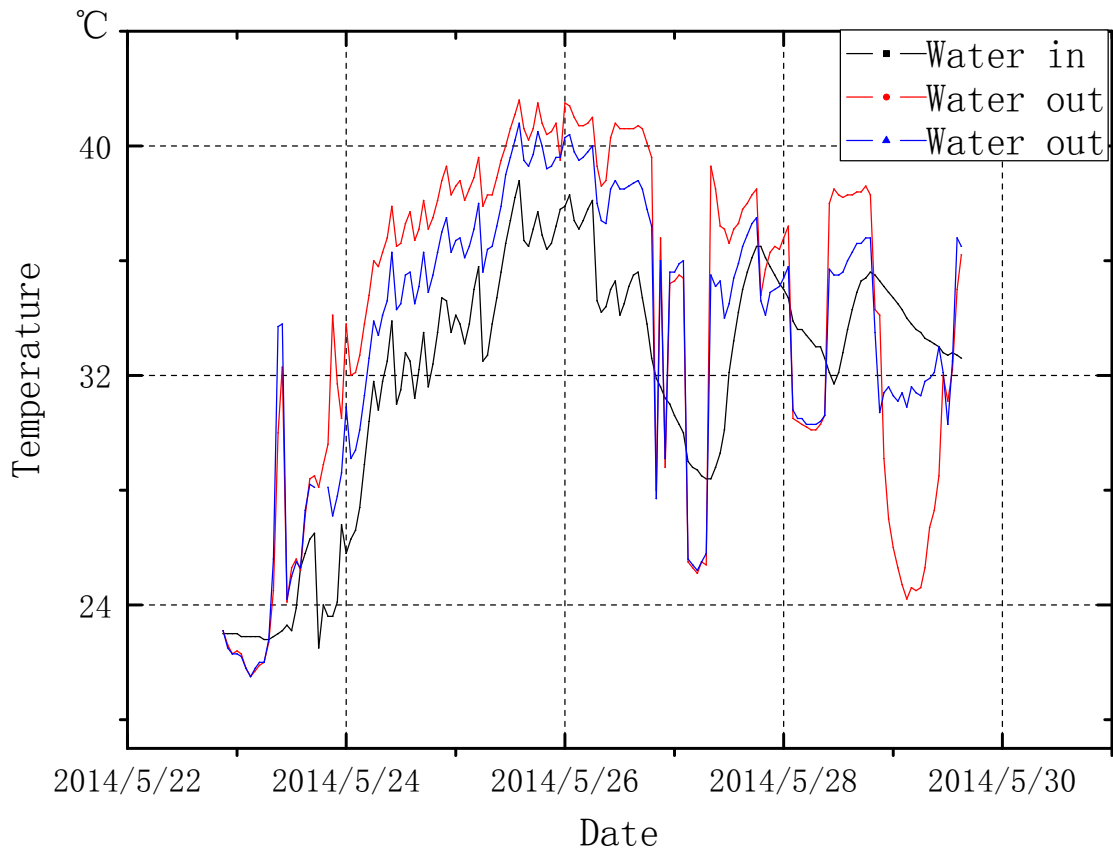


图 4.24 冷却水管进出口温度发展曲线

Fig. 4.24 Temperature history curve for cooling water

分析进出水温度变化曲线，可以得出以下规律：

(1) 由于循环通水，水温整理上会随着混凝土温度升高而不断升高，应利用好出水口的温热水实时调整表面蓄水水温，做好表面保温。

(2) 通过合理的流速调节，进出口水温差可以控制在 5°C 以内。

(3) 中间部位一套水管进出口水温差较大，与实际相符。

(4) 由于水箱不密封，水温受环境温度影响会有起伏。

(5) 图中突变处为因水泵检修或其他因素停水造成。

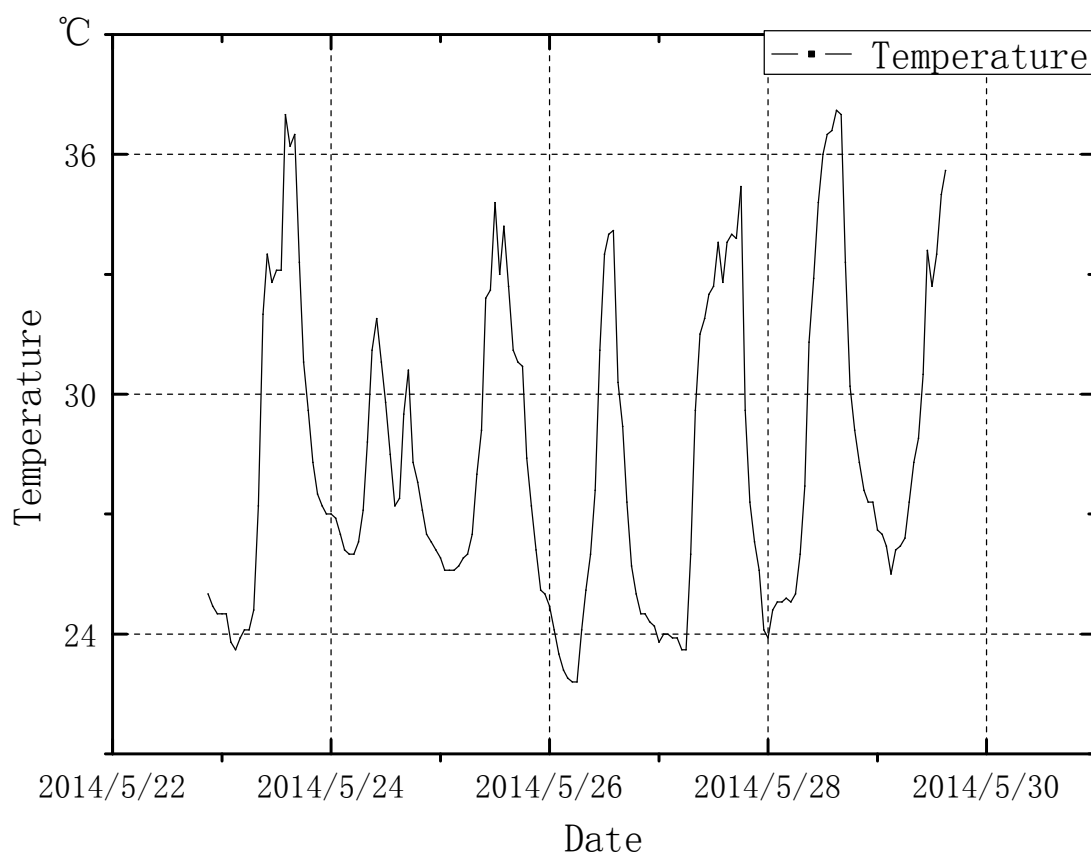


图 4.25 仓内环境温度发展曲线

Fig. 4.25 Temperature history curve for environment sensors

分析仓内环境温度变化曲线，可以得出以下规律：

- (1) 仓内温度受太阳辐射和天气变化影响较大，每日下午 14-16 点温度较高处于波峰，最高可达 50℃；每日夜间 2-4 点温度最低处于波谷，最低可达 23℃。
- (2) 仓内环境温度昼夜温差可达 10℃以上，考虑在夜间做好防风保暖工作。
- (3) 尽量避免混凝土表面受太阳直射，可以加装遮阳棚。

4.2.4 温控过程与结果

(1) 最高温度与内表温差监测与控制

为控制混凝土早期表面温度应力，对混凝土内部及表面各测点温度进行了实时监控，根据监测数据调整温控措施，通过“内降外保”的方式对混凝土温度进行控制，主要采取了以下温控措施。

混凝土覆盖水管后（约 25℃），即开始通水，并加入了冰块以降低入水温度，增强降温效果，压制混凝土初始温度，以达到控制混凝土最高温度、延缓温升的效果。根据监测结果，控制通水流速，控制出水口水温大于 30℃，将流出温热水用于顶面蓄水，对顶面进行保温。在钢模板外喷涂 1.5-2.0 cm 聚氨酯泡沫对侧面进行保温。根据混凝土内部温升速率、进出水口温差等信息，调整水流速度。通过以上措施，混凝土内部最高温度和内表温差得到很好的控制。混凝土内部最高温度为 52.6℃，最大内表温差为 16℃，均满足温控标准要求。

（2）降温速率监测与控制

为减小混凝土收缩造成的外约束应力，需严格控制混凝土内部降温速率。主要通过表面保温和降低通水流量两措施，将混凝土内部平均降温速率控制在 2℃/d（前期降温稍快控制在 3℃/d）。

5 月 27 日下午 14 点，监测结果显示混凝土顶面与环境温差小于 15 度，中心与表面温差小于 17℃，中心平均温度小于 45℃（中心顶面 Z5 测点 30.4℃，内部最高温度 X1 测点 47℃，仓内环境温度 T4 测点 24℃），满足撤出蓄水条件，顶面开始撤出蓄水，18 点开始凿毛工作。

5 月 28 日早 8 点，监测结果显示，侧表面 X3 测点 41.6℃，中心最高 Z2 测点 44.3℃，仓内环境温度 T4 测点 28.9℃，侧面满足拆模条件，侧面开始模板拆除工作。根据实测内部降温速率，逐步减小水流速度后，于 28 日下午 17 点完全停止通水。目前混凝土已经历前期快速降温阶段，进入平稳降温阶段，至 5 月 29 日下午 14 点，中心最高温度 Z2 测点 42.3℃，表面温度在 30~40℃之间，降温速率控制良好，逐渐接近环境温度。

（3）结果

截至到 5 月 29 日，左幅承台第一层在相应温控措施下，温度按预计情况发展，已经历温度上升阶段与温度峰值，进入平稳降温阶段。根据监测结果，目前顶面已撤除蓄水进行凿毛工作，未发现裂纹产生。根据监测结果，已拆除侧面模板并进行了回填工作，未发现温度裂缝。整个温控过程期间，温度监测系统运行良好。

4.3 本章小结

本章首先介绍了大体积混凝土模型实验整个过程，包含工程概况、测点布设、数据采集与分析、监测过程与结果。然后介绍了某大桥承台锚碇大体积混凝土温控监测，包含工程概况、测点布设、数据采集与分析、温控过程与结果。通过实际工程进一步验证

了该系统设计与实现的各项核心功能。通在实际工程中应用大体积混凝土无线温度监测系统，极大的方便了温控监测工作，保障了混凝土的施工质量，确保了无温度裂纹发生。

结 论

本文针对现今大体积混凝土温度监测手段的不足，发展了一种一体化的监测系统，包含一种快速布设的无线传感节点；能够容纳上万个温度节点的大规模无线传感网络；能够实现混凝土温度信息的采集与存储、显示与预警、管理与分析的智能化监测软件；最后形成了集温度探头、传感器网络、监测软件为一体的大体积混凝土温控监测系统。

本文的主要结论如下：

（1）设计并实现了大体积混凝土温度监测的硬件系统。硬件系统包含一种快速布设的无线传感节点；包含一种能够容纳上万个温度节点的大规模无线传感网络；包含一种易于制作的光纤光栅温度传感探头；包含一种能够实现现场与远程监控的网络架构。硬件系统实现了温度感知、无线数据传输、无线数据采集、现场与远程监测等核心功能。

（2）设计并开发了配套的大体积混凝土温度监测软件系统。软件系统实现了大体积混凝土中心温度、表面温度、里表温差、冷却水管温度、环境温度的实时显示与历史温度查询等功能。以及在此基础上实现了自动计算降温速率、最高温升等关键温控指标的功能。软件支持对多个监测任务进行统一管理，同时实现了温度在测点图上的直接显示以及监测数据导出到 Excel 的功能，提升了大体积混凝土温度控制信息化水平，减轻了现场温度监测人员的工作强度。

（3）将研制开发的大规模无线温度监测系统分别应用于实际工程项目中。包括大体积混凝土模型试验温度监测项目、某大桥承台锚碇大体积混凝土温控监两个项目。工程实践表明，该系统具有布设方便快捷、温度测点数量大、智能化程度高等优点，实现了对混凝土温度信息的自动采集与存储、显示与预警、管理与分析等应用需求，研发出的大体积混凝土温度监测系统确保了温度监测任务的顺利实施，具有良好的工程应用前景。

参 考 文 献

- [1] 欧进萍. 重大工程结构的智能监测与健康诊断[C], 第十一届全国结构工程学术会议论文集第 I 卷, 2002
- [2] Zhu Y, Xu Z, He J, et al. A Calculation Method for Solving Temperature Field of Mass Concrete with Cooling Pipes [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2003, 2: 6.
- [3] Kodur V, Sultan M. Effect of Temperature on Thermal Properties of High-strength Concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003, 15(2): 101-107.
- [4] Bo-fang Z. Current Situation and Prospect of Temperature Control and Cracking Prevention Technology for Concrete Dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 12: 1424-1432.
- [5] Weiwen LWDBL, Feng X. The Study on Thermal Stress and Temperature Crack of Underground Mass Concrete [J]. Industrial Construction, 2008, 7: 19.
- [6] 邹建文, 徐伟. 超大体积承台混凝土温升变形影响因素应用研究[J]. 结构工程师, 2009, (6): 133-137.
- [7] 薛礼兵, 王旭峰. 大体积混凝土温度裂缝在实际工程中的控制技术[J]. 结构工程师, 2006, (4): 86-88, 93.
- [8] 龚剑, 刘颖浩, 袁勇. 大体积高强混凝土早期温度、应变测试与分析[J]. 结构工程师, 2012, (1): 111-116.
- [9] 宋正峰, 张会东, 赵文博. 大体积混凝土工程裂缝控制[J]. 结构工程师, 2011, (S1): 285-287.
- [10] 李群. 大体积混凝土裂缝产生原因及控制方法[J]. 中华建设, 2012, (3): 134-135.
- [11] 王利红. 高性能混凝土配合比的优化设计[D]. : 山东大学, 2014.
- [12] 刘京红, 梁钲, 刘晓华, 等. 大体积混凝土施工中的温度监测及裂缝控制[J]. 河北农业大学学报, 2008, (2): 106-109.
- [13] 叶雯, 杨永民. 大体积混凝土施工温度监测及其温度应力分析[J]. 混凝土, 2008, (9): 104-107.
- [14] 解荣. 大体积混凝土温度监控的研究[D]. 长安大学, 2011.
- [15] 何文敏, 郭建民. 大体积混凝土芯部温度监测[J]. 铁道工程学报, 2011, (6): 64-67, 106.
- [16] 俞锐, 方铭, 黄阳, 等. 大体积混凝土温度监测系统及应用[J]. 工程设计 CAD 与智能建筑, 2002, (5): 60-62, 65.
- [17] 卓维松. 大体积混凝土温度监测技术[J]. 福建建材, 2013, (4): 20-21.
- [18] 朱伯芳. 全面温控 长期保温 结束“无坝不裂”历史[C]//第五届碾压混凝土坝国际研讨会论文集(上册), 2007:

- [19] Rawhouser C. Cracking and Temperature Control of Mass Concrete[C]//Aci Journal Proceedings, [S.l.]: Aci, 1945:
- [20] Springenschmid R. Prevention of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages[M]. [S.l.]: Crc Press, 1998:
- [21] Gajda J,Vangeem M. Controlling Temperatures in Mass Concrete.[J]. Concrete International, 2002, 24(1): 58-62.
- [22] Xu B,Sun L,Lin L. Early-age Temperature-monitoring and Analysis of a Pump-station's Mass Concrete Foundation Mattress in Hot Weather [Z].: Concrete, 2005:
- [23] Hou J,Xiong J,Yuan Y. Controlling and In-site Monitoring Temperature in Mass Concrete [J]. Concrete, 2004, 5: 17.
- [24] Mao-chun Z. Mass Concrete Temperature Monitoring[J]. Technological Development of Enterprise, 2010, 21: 33.
- [25] 宋智慧,刘京红,高宗章,等. 基础底板大体积混凝土的温度监测及裂缝控制[J]. 河北农业大学学报, 2008, (5): 96-99.
- [26] 刘沐宇,徐黎明,汪峰,等. 广州黄埔大桥承台大体积混凝土温度控制与监测分析[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2008, (1): 12-16.
- [27] 胡奇. 飞龙岛大桥承台大体积混凝土温度与裂缝控制研究[D]. : 武汉理工大学, 2009.
- [28] 朱登远. 海洋环境特大型桥梁基础大体积承台温控技术研究[D]. : 长安大学, 2014.
- [29] 黄河. 基于 DS18B20 的单总线数字温度计[J]. 湘潭师范学院学报(自然科学版), 2008, (4): 60-63.
- [30] 王胜利,冯伟,刘剑科. 单总线分布式测温系统[J]. 工矿自动化, 2005, (5): 49-51.
- [31] 肖志飞,张铁肩,孙秋桐. 基于 DS18B20 的单总线温度巡检系统[J]. 电子工程师, 2005, (12): 57-59.
- [32] 贾洪彩,齐志才,马占敖,等. 基于 DS18B20 多点温度巡检系统的研究[J]. 吉林建筑工程学院学报, 2003, (4): 49-53.
- [33] 朱群峰,王晓芳,黄磊. 基于 DS18B20 的多路温度采集系统[J]. 船电技术, 2009, (2): 7-9.
- [34] 郑宝瑞,陆仲达. 基于 DS18B20 的智能温度巡检仪的研制[J]. 齐齐哈尔大学学报(自然科学版), 2010, (3): 21-23.
- [35] 朱仲英. 传感网与物联网的进展与趋势[J]. 微型电脑应用, 2010, (1): 1-4.
- [36] 孙亭,杨永田,李立宏. 无线传感器网络技术发展现状[J]. 电子技术应用, 2006, (6): 1-5, 11.
- [37] Yick J,Mukherjee B,Ghosal D. Wireless Sensor Network Survey[J]. Computer Networks, 2008, 52(12): 2292-2330.
- [38] Xu N,Rangwala S,Chintalapudi KK, et al. A Wireless Sensor Network for Structural Monitoring[C] Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, [S.l.]: Acm, 2004: 13-24.

- [39] Hocker G. Fiber-optic Sensing of Pressure and Temperature[J]. Applied Optics, 1979, 18(9): 1445-1448.
- [40] Bakker A, Huijsing JH. Micropower Cmos Temperature Sensor with Digital Output[J]. Solid-state Circuits, Ieee Journal of, 1996, 31(7): 933-937.
- [41] 刘继民, 沈颖, 赵淑萍. 高精度热敏电阻温度传感器的技术改进及使用特点[J]. 冰川冻土, 2011, (4): 765-771.
- [42] 席军, 刘廷华. PTC 热敏电阻的开发应用现状[J]. 塑料, 2005, (4): 79-84.
- [43] 王恩信, 荆玉兰, 王鹏程, 等. NTC 热敏电阻器的现状与发展趋势[J]. 电子元件与材料, 1997, (4): 3-11.
- [44] 陈良, 侯予, 习兰. 铜-康铜热电偶的标定与误差分析[J]. 低温工程, 2008, (6): 18-23.
- [45] 郑晓文. 关于热电偶冷端补偿问题的探讨[J]. 宇航计测技术, 2002, (6): 53-59.
- [46] 陈良光, 宋荷庆, 金华频. 数字式温度传感器原理及其应用[J]. 中国仪器仪表, 2001, (1): 15-18.
- [47] Chen P, Chen C, Tsai C, et al. A Time-to-digital-converter-based Cmos Smart Temperature Sensor[J]. Solid-state Circuits, Ieee Journal of, 2005, 40(8): 1642-1648.
- [48] Pertijs MA, Bakker A, Huijsing JH. A High-accuracy Temperature Sensor with Second-order Curvature Correction and Digital Bus Interface[C] Circuits and Systems, 2001. Iscas 2001. the 2001 Ieee International Symposium on, [S.l.]: Ieee, 2001: 368-371.
- [49] Ortega A, Marco S, Perera A, et al. An Intelligent Detector Based on Temperature Modulation of a Gas Sensor with a Digital Signal Processor[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2001, 78(1): 32-39.
- [50] Mainwaring A, Culler D, Polastre J, et al. Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring[C] Proceedings of the 1st Acm International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, [S.l.]: Acm, 2002: 88-97.
- [51] 姜德生, 何伟. 光纤光栅传感器的应用概况[J]. 光电子·激光, 2002, (4): 420-430.
- [52] 柴伟. 光纤布拉格光栅温度传感技术研究[D]. : 武汉理工大学, 2004.
- [53] 欧进萍. 重大工程结构智能传感网络与健康监测系统的应用[J]. 中国科学基金, 2005, (1): 10-14.
- [54] 张军. 智能温度传感器 DS18B20 及其应用[J]. 仪表技术, 2010, (4): 68-70.
- [55] 胡天明, 齐建家. 基于 DS18B20 的数字温度计设计及其应用[J]. 黑龙江工程学院学报, 2008, (2): 59-62.
- [56] 陈文周. WiFi 技术研究及应用[J]. 数据通信, 2008, (2): 14-17.
- [57] 蔡型, 张思全. 短距离无线通信技术综述[J]. 现代电子技术, 2004, (3): 65-67, 76.
- [58] 周怡頔, 凌志浩, 吴勤勤. ZigBee 无线通信技术及其应用探讨[J]. 自动化仪表, 2005, (6): 5-9.
- [59] 邓荣钦. 基于 GPRS 的无线监控系统的应用[D]. 武汉理工大学, 2007.

- [60] Hill KO, Meltz G. Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1263-1276.
- [61] Chryssis AN, Lee SM, Lee SB, et al. High Sensitivity Evanescent Field Fiber Bragg Grating Sensor[J]. Photonics Technology Letters, Ieee, 2005, 17(6): 1253-1255.
- [62] Patrick H, Williams G, Kersey A, et al. Hybrid Fiber Bragg Grating/long Period Fiber Grating Sensor for Strain/temperature Discrimination[J]. Photonics Technology Letters, Ieee, 1996, 8(9): 1223-1225.
- [63] Dong X, Liu Y, Liu Z, et al. Simultaneous Displacement and Temperature Measurement with Cantilever-based Fiber Bragg Grating Sensor[J]. Optics Communications, 2001, 192(3): 213-217.
- [64] Zhang L, Wang J, Sui Q. Application of Labview on Fiber Bragg Grating Demodulation System[J]. Information Technology, 2007, 6: 36-39.
- [65] 王志俊. 浅析 C 与 C#[J]. 科学之友(B 版), 2009, (6): 146-147.
- [66] Wigley A, Sutton M, Wheelwright S, et al. Microsoft. Net Compact Framework: Core Reference[M]. [S.l.]: Microsoft Press, 2002:
- [67] Gousset M, Hinshelwood M, Randell BA, et al. Professional Application Lifecycle Management with Visual Studio 2013[M]. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2014:
- [68] 冉林仓. Visual Studio 十年磨一剑[J]. 程序员, 2007, (5): 10, 120-123.
- [69] Welling L, Thomson L. Php and Mysql Web Development[M]. [S.l.]: Sams Publishing, 2003:
- [70] 兰旭辉, 熊家军, 邓刚. 基于 MySQL 的应用程序设计[J]. 计算机工程与设计, 2004, (3): 442-443, 468.
- [71] 赵鹤芹. 设计动态网站的最佳方案: Apache+PHP+MySQL[J]. 计算机工程与设计, 2007, (4): 933-934, 938.

攻读硕士学位期间发表学术论文情况

- 1 大体积混凝土无线温度监测系统[J]. 申宇, 王滋元, 谢朝晖, 周智. 工业建筑, 2015 年, 卷(期): 10-11 主办单位: 中冶建筑研究总院有限公司。中文核心期刊(本硕士学位论文第一章~第四章)
- 2 Advances of Optic Fiber Fabry-perot Interferometry sensors. **Yu Shen**, Zhi Zhou. Pacific Science Review, 2013 年, 卷(期) 15: 108-116. (本硕士学位论文第二章)
- 3 Polydimethylsiloxane fabricated Optical Fiber Sensor capable of measuring both large axial and shear strain. **Yu Shen**, Ziyuan Wang, Zhi Zhou. Photonic Asia, 2014 年, Proceedings of SPIE (本硕士学位论文第二章)
- 4 大体积混凝土结构水泥品种选择研究[J]. 王滋元, 阳超成, 申宇, 周智. 工业建筑, 2015 年, 卷(期): 10-11 主办单位: 中冶建筑研究总院有限公司。中文核心期刊(本硕士学位论文第四章)
- 5 Mass Concrete Temperature Control Program Design and its Implementation Based on Ordinary Portland Cement. Pacific Science Review, Yang Chaocheng, Wang Ziyuan, **Shen Yu**, and Zhou Zhi. 2015 年. (本硕士学位论文第四章)
- 6 深海立管姿态监测的分布式光纤传感技术[J]. 任鹏, 申宇, 李轩, 周智. 中国海洋平台, 2014 年, 卷(期): 02:26-32. (本硕士学位论文第二章)
- 7 基于 PVDF 的无线智能疲劳监测系统[J]. 白石, 周智, 申宇, 欧进萍 航空学报, 2014 (本硕士学位论文第二章)

致 谢

本论文的工作是在导师周智教授的悉心指导下完成的。无论是论文的选题、框架的构建还是最后的修改和定稿，周老师都倾注了大量的时间和心血。周老师创新的思维和勤勉的工作态度给了我极大的影响。周老师的平易近人、务实求真、积极进取的人生态度也深深地影响着我。在此衷心感谢三年来周老师对我的关心和指导。

衷心感谢在工程项目实施期间，在谢朝晖、王滋元、阳超成、于宪政、文怀海的帮助下取得了大量的实验数据，为课题提供了有力的支撑。同时感谢课题组何建平、任鹏、王花平、焦彤、王俊、程鸿伟、郝孝伟、高锡鹏、贾及汉、彭康林等人一起共同参与完成了项目，保障了项目的顺利实施。特别感谢白石师兄对我小论文提出了诸多宝贵建议。同时感谢申娟、王珍珍、刘嘉、William 对我一直以来的大力支持。

特别感谢我的家人和亲朋好友，他们的亲切关怀和大力支持是我能够顺利成功完成学业的重要保障。

大连理工大学学位论文版权使用授权书

本人完全了解学校有关学位论文知识产权的规定，在校攻读学位期间论文工作的知识产权属于大连理工大学，允许论文被查阅和借阅。学校有权保留论文并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印、或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

学位论文题目：_____

作者签名：_____ 日期：_____年____月____日

导师签名：_____ 日期：_____年____月____日