

## 摘 要

机器人一直是各国竞相研究、集成最新科技成果的高技术象征。最近几年,机器人技术的发展理念发生了根本的变化,开放性、小型化、高柔性和高智能已成为机器人发展的主流方向,而体现上述特点的人机交互和信息传输一直是制约机器人发展的重要因素之一。蓝牙技术的出现,无疑为机器人发展开辟了一条崭新的通道。

蓝牙技术是一种无线数据与语音通信开放性全球规范,它在设计之初的主旨,就是取代现有的短距离无线通信方式,成为性能最好、价格最低的一种短距离无线通信方式。蓝牙通信方式必然将成为多机器人通信的一个最重要的方式,这是由蓝牙技术本身所具有的特色和优势决定的,是一些其它的通信方式无法比拟的。

本文探讨了蓝牙技术应用在分布式多机器人系统中存在的问题,并针对这一问题提出了一种解决方案:一种适合分布式多机器人的蓝牙网络模式。这种蓝牙网络模式是在蓝牙通信技术基础上,结合一定的思想和算法,使蓝牙网络中的各个主体在关系上表现得更加平等、自主,同时又能很好的相互通信和协调,充分体现多机器人系统的基本特征。本文给出了这种蓝牙网络模式的硬件和软件实现以及蓝牙通信系统的实现。

此外,本文还简要介绍了可移动机器人的制作。这个可移动机器人能够自动移动,转弯以及检测周围是否有障碍物,如果有障碍物,那么能够自动测量障碍物与之间的距离,并且能够自动的转弯避开这个障碍物。这个机器人的制作是为了给机器人的蓝牙通信提供一个平台,以及检验令牌式蓝牙网络模型。

**关键词:** 蓝牙通信, 移动机器人, 红外线传感器, 超声波检测

## Abstract

Robot research is always the high-technology symbol, it usually integrates up to the minute science and technology harvest, and so many countries now pay most important attention to robot research. In recent years, the trend and conception of the robot technology development have thoroughly changed. Opening, miniaturization and high-pliability, as well as high-intelligence have become the main trends of robot's development. The alternation and communication between human and robot is one of factor, which restrict the robot research's development. The appearance of the bluetooth technology without fail inaugurates a new channel for robot research's development.

Bluetooth wireless technology is a short-range radio technology. Bluetooth radio uses a fast acknowledgement and frequency-hopping scheme to make the link robust, even in noisy radio environments. The aim of the bluetooth technology is to replace the existing short-range wireless communication manner, and to be a kind of communication technology which has the best capability and the lowest price. Bluetooth necessarily turn to one of the most important manner for the multi-robot communication, because it has many features and advantages which other communication technologies haven't.

In this paper, the problems which maybe happen when the bluetooth technology is applied to distributed multi-robot system (DMRS) have been discussed. Aim to fix those problems, we proposed a dynamic bluetooth mode, which named for the token bluetooth network mode. This bluetooth network model based on bluetooth communication technology and combined some ideas and arithmetic, in order to embody the basic character of multi-robot system that the relationship among the agents is equal and independent and each robot can communicate and interoperate with others well very. Finally, the realizations of the token bluetooth network model and bluetooth communication system have been introduced respectively in details.

Furthermore, the process of a simple removable robot's produce has been introduced briefly in this paper. This simple removable robot can move and swerve automatically, as well as inspect whether there are some barriers around it. If there are barriers, it can measure the distance between the barrier and itself, and evade those barriers automatically. There are two main purposes why we produce this simple removable robot: one is to provide a good experiment tool for robot's bluetooth communication, the other is to verify the token bluetooth network model.

**Keyword:** bluetooth communication, Removable robot, Infrared sensor, Ultrasonic inspection

# 第1章 绪 论

## 1.1 引 言

“蓝牙”技术是一种短距离无线宽带通信技术，是当今世界公认的十大科技成果之一。迄今为止，蓝牙应用主要还是集中在 PNA(Personal Network Area)，SIG 成员公司更看重蓝牙目前的几个主要技术特性：功耗小，传输稳定、可靠、安全，并且可以集成在任何需要无线传输的产品中。同时许多第三方厂商在蓝牙应用开发研究方面，重点集中在拥有大量用户的手持设备产品上，所以不可避免地出现了蓝牙应用貌似狭窄的现象。另外，许多开发者以及用户更加注重传输速率和传输距离的要求，再加上 802.11b 无线系列产品的迅速发展，及其在传输速率和距离上的优势及今后两年的发展趋势，导致了许多对蓝牙应用性能方面的猜疑。但综合目前传输距离 / 功耗而言，包括支持厂商的数量以及其集成的规模和趋势，蓝牙在短距离范围无线传输上有绝对的优势。

机器人一直是各国竞相研究、集成最新科技成果的高技术象征。最近几年，机器人技术的发展理念发生了根本的变化：让机器人来完成人不想干的体力劳动是早期开展机器人研究的根本动力；让机器人实现人类的智能扩展，从事人类想干的脑力劳动或辅助人的智能活动，已成为新的目标。而且，机器人在医疗、服务、娱乐、生物、医药、环保、军事、核工业、水下、空间、农业、工业、建筑、救灾和排险等许多领域都开辟了前所未有的应用空间。开放性、小型化、高柔性和高智能已成为机器人发展的主流方向，而体现上述特点的人机交互和信息传输一直是制约机器人发展的重要因素之一。蓝牙技术的出现，无疑为机器人发展开辟了一条崭新的通道。但是，蓝牙与机器人之间的接口并非是简单的叠加，而是集机械、电子、传感、控制和通讯技术于一体的多种信息的融合，是多项高技术的集成，因而必然会带来一些核心难题，如基于“蓝牙”人机协调、多传感器融合和协调控制等。所以，基于蓝牙的机器人研究，就机器人研究本身而言是一个很大的技术进步。同时，机器人也将对蓝牙接口及其应用开发提出要求，因此在未来几年中蓝牙与机器人集成研究将走在蓝牙应用开发的前列，具有代表性。

从一定意义上讲，机器人水平的高低集中体现了这个国家的综合科技实力。如何将蓝牙应用于机器人已成为该领域的研究热点之一，蓝牙技术为开放

式机器人与信息空间之间的可靠衔接提供了技术保障。如何在这一技术竞争中赢得应有的市场空间和产业机会,对我国高技术产业和信息产业的发展有着非常重要的意义。同时,机器人技术具有极好的代表性,对促进“蓝牙”的应用及其发展具有重大指导意义。

## 1.2 研究的目的及意义

课题来源于重庆市自动化控制技术重点实验室开放基金(20030F01),研究的主要目的是利用蓝牙技术实现多个对等移动机器人之间的相互通信与控制,这个课题的研究在实际应用和理论方面都具有重要的意义:

1、在实际应用方面,将蓝牙技术应用于多个移动机器人之间的通信,是对现有机器人通信方式的一种必要而有意义的补充。

目前,多机器人之间通信的主要方式有现场总线方式、红外线方式等。现场总线技术多种多样,通信标准各自为政,难以实现统一,使系统的开放性大打折扣,此外,在通信时还必须用电缆将各个机器人相连接起来,这在有时走线非常困难甚至是不可能的情况下,将成为其致命的缺陷。红外线传输(Infrared Deliverable Access—IrDA)在机器人无线通讯中也是常常被人使用的技术,这种无线传输方法在技术上与蓝牙有着极大的差异,甚至有人预测蓝牙在未来将取代红外线成为最主要的连线技术。蓝牙通信使用 2.4GHz 附近的无线电频道,1 个频道使用 1MHz 共 79 个信道,每个信道的通讯速度可达 1Mbps。通信范围以 10m 以内为主,不过在特殊情况下可加大发射功率达到 100m 左右。IrDA 则采用 850~900nm 的红外线传输,其传输的距离与传输速度成反比,最快可达 16Mbps,但距离必须在 1m 以内;相反如果传输速度降至 75kbps,其传输距离则可达到 5m 以上。因此,在距离和传输速度方面,蓝牙(Bluetooth)具有比较大的优势。此外,红外线通信方式也容易受到干扰,还有接受角度的限制,而蓝牙通信技术则已经克服了上述的不足,因此将蓝牙技术应用在多机器人通信是非常有意义的,它可以提高机器人之间无线通信的可靠性、有效性。

蓝牙技术是一种无线数据与语音通信开放性全球规范,是由 Ericsson、IBM、Intel、Nokia 和 Toshiba 等公司于 1998 年联合推出的一项最新的短距离无线通信技术。它在设计之初的主旨,就是取代现有的短距离无线通信方式,成为性能最好、价格最低的一种短距离无线通信方式。它的最大符号速率为

1Mb/s, 它以低成本的近距离无线连接替代了电缆连接, 在小范围内将各种移动与固定通讯设备、计算机及其终端设备等连接起来, 实现了无缝的资源共享。此外, 为了进一步提高数据的抗干扰能力, 蓝牙技术采用了跳频扩展频谱技术。蓝牙目前的几个主要技术特性: 功耗小, 传输稳定、可靠、安全, 并且可以集成在许多产品中。综合目前传输距离/功耗而言, 包括支持厂商的数量以及其集成的规模和趋势, 蓝牙在短距离范围无线传输上有绝对的优势。蓝牙通信方式必然将成为多机器人通信的一个最重要的方式, 这是由蓝牙技术本身所具有的特色和优势决定的, 是一些其它的通信方式无法比拟的。

## 2、给出一种更适合多个独立机器人的蓝牙网络模型, 具有重要的理论指导意义。

蓝牙技术提供点对点和点对多点的无线连接。首先发起通信要求的设备称为主设备, 被动进行通信的设备称为从设备。一个主设备(Master)最多可同时与 7 个从设备(Slave)进行通信并和多个 Slave(最多可超过 200 个)保持同步但不通信。一个主设备和一个以上的从设备构成的网络称为蓝牙的皮克网(Piconet)。皮克网中信道的特性完全由主设备决定, 主设备的蓝牙地址(BD\_ADDR)决定了跳频序列和信道接入码; 主设备的系统时钟决定了跳频序列的相位和时间。

从上述蓝牙技术的特性可以看出, 在蓝牙设备组成的网络(Piconet)中存在着较为明显的主从关系: 所有的从设备与主设备之间的通信都由主设备控制, 1 台从设备与另 1 台从设备通信的唯一途径也是通过主设备。然而, 本课题研究的多个移动机器人, 他们在关系上是对等的, 都具有很强的自主性, 不存在较明显的主从关系。因此, 蓝牙技术的基本特性与本课题研究的多机器人通信的基本特征相矛盾, 针对这一矛盾, 本论文中提出了一种蓝牙网络模型——令牌式动态蓝牙网络模式。令牌式动态蓝牙网络模式能够使蓝牙网络中每个机器人在关系和功能上表现得更加平等、自主, 同时各个独立的机器人又能很好地相互协作完成某一任务。

因此, 本课题的研究不论是从理论上还是从实际应用方面来看都是必要的, 具有重要意义的。

## 1.3 国内外研究现状分析

自 1994 年爱立信提出蓝牙技术以来, 这项低功耗、低成本的无线连接技术已经获得了巨大的发展, 从整体发展来看, 蓝牙技术从提出到现在大约经历了

3 个阶段。第一阶段：蓝牙技术的提出。1994 年，爱立信公司的工程师苦恼于日益增多的连接线缆，提出了使用无线通信技术来代替线缆连接的思想，并将这种技术命名为“bluetooth”（蓝牙）；第二阶段：蓝牙技术的发展。1998 年 5 月，Ericsson、Nokia、Toshiba、IBM 和 Intel 成立了蓝牙特殊兴趣小组(SIG)，加大了对蓝牙的投资力度，致力于蓝牙协议的研究制定。第三阶段：蓝牙技术的逐渐成熟，截止目前，SIG 的成员已经超过了 2500 家，“蓝牙”技术正在日渐普及，市场上的产品也在不断增多。2002 年，国际市场上已经有 500 多种“蓝牙”产品，其中有 200 种属于消费产品，包括移动电话、“蓝牙”耳机等。

国内对蓝牙技术的研究起步较晚，高校、科研单位、企业在 1999 年以后才对蓝牙进行了较多的关注和跟踪。中国参加蓝牙国际 SIG 的单位，包括企业、研究机构大约有 30 多个，与世界 2491 个单位相比，占的比例很小。一部分高校、科研单位和企业对蓝牙技术进行了跟踪和研究，如清华大学、北京邮电大学、东南大学、重庆大学等等。但大多还处于应用研发的初期，对蓝牙协议进行研究的很少，成熟的蓝牙产品也为数不多，从整体情况看来，目前我国对蓝牙技术的研究还比较落后。

目前，蓝牙协议还处于不断完善期。此外，蓝牙技术在各行业广泛使用以前，还需要大量的研究与测试工作，以证明蓝牙技术能满足各种特定情况下的通信要求。

## 1.4 课题研究的主要内容

本课题需要制作完成一个蓝牙局域网大系统。这个大系统由三个独立的、对等的嵌入式控制子系统组成，每个嵌入式控制子系统都含有蓝牙模块，他们之间通过蓝牙通信协议彼此传输信息，以此相互协作完成一定难度的合作功能。例如：当三个或多个机器人在一个小的范围内各自运动时，如何避免这三个或多个机器人之间发生碰撞，这就是一个相互协作的问题。针对这个蓝牙局域网大系统，存在着以下两个主要内容需要研究：

- 1、对蓝牙通信网的网络结构进行规划，设计出一适合由多个独立机器人组成的蓝牙网络模型。

- 2、嵌入式控制器的设计；嵌入式控制器的设计和研究，将是本课题研究的另一个主要内容。嵌入式控制器的设计整体上包括硬件设计和软件设计这两个

部分，它所需要完成的主要功能是：（1）实现所设计的蓝牙通信网络；（2）控制移动机器人完成基本的操作，例如控制机器人移动、转弯，避障等等种运动。

## 第2章 蓝牙技术及其在多机器人通信中的应用

### 2.1 蓝牙技术

#### 2.1.1 蓝牙技术背景

##### (1) 蓝牙技术究竟是什么

蓝牙技术是公开的无线数据和语音通信标准,旨在建立低功耗、低成本、短距离、小型化的无线连接,它将所有的技术和软件集成于  $8\text{mm} \times 8\text{mm}$  的芯片内。蓝牙技术将使特定的蓝牙设备如蓝牙移动电话、蓝牙便携式电脑以及其他各种便携式蓝牙设备在近距离内实现资源的无缝共享。使人们能够随时随地实现个人区域内语音和数据信息的交换与传输,从而实现快速灵活的通信。

##### (2) 蓝牙的命名

最早提出蓝牙概念的是爱立信移动通信公司。在1994年,爱立信移动通信公司提出了为移动电话及电话附件之间寻找一种低功耗、低成本的无线接口,而作为无线接口首先需要规定其工作的频谱范围,对技术造价、容量和接口尺寸大小也进行了预先规定,目的是要保证该技术具有所有线缆连接所没有的优势:该无线单元的尺寸和功耗都必须足够小,使得它可以安装进许多便携设备中。另外该技术必须支持语音和数据通信,最重要的是该技术应具有全球通用性。研究的结果表明短距离无线链路方案是可行的,当设计者们开始开发收发芯片时,爱立信很快意识到他们需要其他公司的协作来共同开发此项技术,因为发展该技术的目标不仅是提高技术的实现及性能,更重要的是要获得来自PC硬件、便携机和移动电话行业坚实的、广阔的市场支持。出于对将来解决方案之间互通性的担心,各相互竞争的公司开始走到一起来进行技术标准化的研究。

1998年2月爱立信(Ericsson)、英特尔(Intel)、IBM、东芝(Toshiba)和诺基亚(Nokia)等公司组成了特别兴趣小组(SIG)。蓝牙SIG的目标是定义一个实际可用的空中接口及其控制软件标准,用以实现来自不同生产厂商的便携计算机、移动电话机和其他设备之间的互通性。任何公司只需签订一个免费的协议,就可以加入蓝牙SIG,进而被授权进行基于蓝牙技术产品的生产和销售。

在此之后,3COM、朗讯(Lucent)、微软(Microsoft)和摩托罗拉(Motorola)也相继加盟蓝牙计划,他们的共同目标是开发一种全球通用的小范围无线通信

技术。那么,为什么取名为蓝牙呢?蓝牙的取名来自于 Harald。Harald 是公元 10 世纪统一丹麦国家的丹麦国王哈托维,“Bluetooth”是哈拉维国王的绰号。他而对当时处于四分五裂的丹麦、瑞典、挪威、芬兰等北欧地区,建立了统一强大的 Danes 王朝,并将基督教引入北欧地区,从而确立了为后人缅怀、颂扬的不朽功勋,瑞典的 Ericson 公司为这种即将成为全球通用的无线技术命名此名。也许大有一统天下的含义。这位与众不同、功名显赫的丹麦国王,无论如何也没有想到,他的名字居然会在千年之后成为一项高新技术的代名词而响彻全球。

### (3) 为什么蓝牙技术如此广受关注

蓝牙技术最早是针对近距离的便携式器件之间的红外线链路(Infrared Link, 简称 IrDA)存在的问题而提出的,应用红外线链路收发器链接,虽然省去电线和电缆的连接,但是使用起来有许多不便,不仅距离只限于 1—2m,而且必须在视线上直接对准,中间不能有任何阻挡,且只限于在两个设备之间实现链接,因此提出来的。上述 9 家成立了世界蓝牙组织 Bluetooth Special Interest Group(SIG),他们采用了技术标准公开的策略来推广蓝牙技术,取得了相当的成功。自 1998 年成立蓝牙特别兴趣小组(SIG)以来,已经有 2500 家左右的信息产品生产厂商加入这个组织,其中包括了计算机、通信和电子行业的所有知名厂商。世界蓝牙组织 Bluetooth SIG 已发展成为一个相当大的工业界高新技术标准化组织,一项公开的、全球统一的技术规范得到如此广泛的关注和支持是以往罕见的:美国权威性杂志《网络计算》将蓝牙技术与 802.11b 无线局域网及宽带技术等评为“十年来十大热门新技术产品”。是什么缘故使得它有如此大的影响力?

人类的需求是无止境的,也正是这种需求推动着技术不断地向前发展。人们对计算机的运算能力和存储空间的需求使计算机技术以“摩尔定律”的速率不断向前发展,当人们在运算能力和容量上得到一定满足的时候,又去追求设备的小型化和便携性能,蓝牙正是人们这种需求和追求的结果。随着技术的发展,便携的数字处理设备已经成为人们日常生活和办公的必需品,这些设备包括笔记本电脑、个人数字助理(PDA)、外围设备、移动电话机、寻呼机和客户电子产品等。它们都具有了较强的处理能力和较大的存储空间,从而形成了一个个人操作空间(POS)。这些设备之间的信息交换还大都依赖于电缆的连接,因而使用非常不方便。虽然无线局域网(WLAN)和红外数据传输在特定的条件下能够替代电缆,但是它们在使用上具有很大的局限性。蓝牙就是为了满足人们在个人操作空间的无线互联而设计的,它使用跳频技术使处于个人操作空间

的设备形成一个无线个人区域网络,真正实现设备之间可移动的、自动的互联。蓝牙正发展成为个人区域网络或短距离无线网络的标准。

#### (4) 蓝牙组织 SIG

蓝牙 SIG 是一个国际性的非营利组织,它的目的是制定蓝牙的技术规范和推广蓝牙技术的应用。该组织由发起会员(Promoter)、合作会员(Associate Member)和接受会员(Adopter)三种会员组成。其中,发起会员共有 9 个,即 3Com、爱立信、IBM、英特尔、朗讯、微软、摩托罗拉、诺基亚和东芝,在所有的会员中它们的地位最高,主要任务是制定规范和市场项目开发。合作会员是一种付费的会员,它们具有访问各种早期规范草案的权利,这些早期的版本包括 0.5、0.7、0.9 和 0.95 版,另外这些会员还可以是蓝牙工作组、蓝牙结构检查委员会和其他 SIG 组的成员。接受成员是一种无付费的成员,只需要签定一个接受蓝牙规范的协议,保证开发的产品符合蓝牙规范的要求,在通过蓝牙认证过程后,就能够访问蓝牙 0.9 和 0.95 草案规范版本。

蓝牙 SIG 的文档有三种类型。一是协议,规定蓝牙从无线层到最高应用层的具体要求和内容;二是剖面(Profile),规定某个具体应用在每个协议层次使用的具体功能和过程;三是测试文档,描述协议和剖面实现的测试过程和方法,在 1.0 之前的版本都是草案,1.0 之后是正式的版本。日前公开的版本是 1.1,并正在酝酿 2.0 版本。

### 2.1.2 蓝牙技术的优点

蓝牙技术的优点可归纳为:功耗非常低(发射功率为 1mW 或 100mW)、价格比较低廉(价格低于 5 美元)、体积非常小(8mm\*8mm)、功能非常强(电话兼容,速率高达 1Mbit/s)、应用非常广(固定和移动设备全可应用,点对点与一点多址均可工作,任何有需要的电子设备均可嵌入应用)、标准非常明(全公开,全透明)。

#### (1) 功耗非常低

随着无线技术的深入人心,辐射也成了消费者非常关心的问题。从蓝牙的应用领域(一般用于电池供电的便携式设备)。对人体的影响及其他无线局域网共存的角度考虑,蓝牙协议设计的首要目标是低功耗;蓝牙主要用于个人操作空间(POS),就是以个人为中心,半径为 10m 的近似于球形范围的区域,因此它的发射功率非常低,且按设备的不同等级分类,有 1mW、2.5mW、100mW 三个等级。当在 10m 之内连接时,蓝牙产品的输出功率仅为 1mW,是微波炉

使用功率的百万分之一，是移动电话功率的小部分，而且，这些输出中也只有一小部分被人体吸收。由世界卫生组织、IEEE 等专家组成的小组表示，检测中并未发现蓝牙产品的辐射对人体有影响，值得注意的是，蓝牙在增加发射功率的情况下也可以达到相当的通信范围。

## **(2) 价格比较低廉**

由于蓝牙解决方案的出现，大多数公司将目标对准了“硅时机”，引起硅市场庞大的竞争和创新。这种竞争使蓝牙硅价格急剧下降，预计到 2005 年底，蓝牙模块价格将低于 5 美元。蓝牙将成为一种廉价、低复杂度、高可靠性的无线接口技术。蓝牙技术中最为关键的是低复杂度，它使得系统的集成度大大提高，从而有利于大幅度降低产品成本。

## **(3) 体积非常小**

当前电子产品发展的日新月异的确为我们带来了不少享受。但是，要把他们连接起来，免不了要用到许多数据线，其结果常常是数据线满桌遍布。对于不同类型、不同厂家的产品，所用数据线有时也不尽相同，缺乏统一的标准。有了蓝牙技术，人们有望从千头万绪的数据线连接工作中解放出来：写有“蓝牙”无线收发程序的小芯片约  $1\text{cm}^2(8\text{mm} \times 8\text{mm})$ ，与电话卡内的芯片一般大小。别看这种只有小指甲盖大小的芯片，有了它，任何嵌入该芯片的设备，在 10m 范围内，不需任何数据连接线，笔记本电脑或移动电话就可以与所有支持蓝牙技术的设备进行高效率的数据联系。在瞬间即可组成一个个人网络系统，在这种网络系统中，使用者只需操纵手中设备，便可遥控周转其他电子设备，或与他们进行数据交流。因此，掌上电脑之间、掌上电脑与移动电话等其他电子设备之间都可以资源共享、同步工作。这无疑将缩短办公时间，大大提高工作效率，为人们的生活带来极大的便利。

## **(4) 功能非常强**

蓝牙技术具有数话兼容、一点对多点的功能，工作范围为 10m，也可扩展到 100m，只需增加功率。在微微网(Piconet)或称匹克网中一个主设备能同时支持 8 个从设备工作，可透过墙壁和其他阻碍完成非视距传输，全向传播，安全保密。

蓝牙技术支持点对点和点对多点的通信，可采用无线方式将若干蓝牙设备连成一个微微网。多个微微网又可互连成特殊分散网，形成灵活的一个区域从而实现各类设备之间的快速通信。

## **(5) 应用非常广**

蓝牙技术的主要好处是消除了千头万绪、令人头疼的电缆线，通常这些电缆是用于连接设备间信息传递和同步所必需的，它简化了小型网络设备(如移动PC、掌上电脑、手机)之间以及这些设备与 Internet 之间的通信，免除了在无绳电话或移动电话、调制解调器、头戴式送/受话器、PDA、计算机、打印机、幻灯机、局域网等之间加装电线、电缆和连接器。现在蓝牙产品把这些电缆全代替了。但它出现的意义远不止这一点，“蓝牙革命”能遍及通信领域的各个方面，能涉及到各种各样的阿络、办公电子和家电信息产品，能波及到社会各个层面各个角落的每个人，是建立人域网(PAN)的理想手段；而且，这种技术可以延伸到那些完全不同的新设备和新应用中去。除此之外，蓝牙无线技术还为已存在的数字网络和外设提供通用接口以组建一个远离固定网络的个人特别连接设备群。

蓝牙技术是一种短距离的无线通信技术，它能将不同的设备和终端全部统一起来。由于蓝牙采用了微波技术，可以绕开障碍物传输信号，因此，用蓝牙芯片制作的遥控器可以遥控整个家庭里的电器，甚至遥控窗帘和门窗开关。蓝牙技术还可应用在战场上：在每个士兵手腕上戴一个蓝牙手环，不仅士兵间可以相互了解战况，还能对士兵的健康和受伤情况随时进行监控，以便及时组织救护，减少牺牲等。

由于蓝牙技术可同时支持数据、音频、视频信号，这使得蓝牙的应用有可能扩展到成千上万种产品，人们可以随时随地以任何方式接入网络。根据蓝牙技术的特点，许多专家都认为在人们未来生活和工作环境中，基于蓝牙技术的产品将会无处不在，拥有广阔的应用前景。蓝牙技术的应用范围是如此之广泛，因而人们很难准确地说出它到底有多少种应用。正是因为如此，蓝牙技术已成为当今世界上投资的热点。

#### (6) 标准非常明

蓝牙技术的灵魂就在于它是全球统一、开放的技术标准，以及世界蓝牙组织 SIG 知识产权共享的策略。从它诞生之日起，蓝牙就是一个由厂商们自己发起的技术协议，完全公开，而并非某一家独有和保密。为此世界蓝牙组织制定了一种新的游戏规则，那就是只有申请加入 SIG 并成为其中一员，并按照所规定的标准和规范工作，才能获得 SIG 授权使用这项技术，从而研发出经 SIG 测试和认证的蓝牙技术产品。当代世界经济一体化的发展趋势日益明显，如果一项涉及大众广泛应用的通信技术不使用统一公开的技术标准，这种技术就不会

有广阔的应用前景,大家都各做各的,产品生产出来后不能互连互通,就只能局限在自家的技术领域内使用。

蓝牙技术采用 2400-2483.5MHz 的 ISM(工业、科学和医学)频段,这是因为:(1)该频段内没有其他系统的干扰,同时频段向公众开放,该频段通常不必经过允许便可直接利用;(2)该频段在全球范围内有效,因而与生俱来的开放性和透明性赋予了蓝牙技术强大的生命力。

### 2.1.3 蓝牙技术特点

蓝牙技术利用短距离、低成本的无线连接替代了电缆连接,从而为现存的数据网络和小型的外围设备接口提供了统一的连接。它具有许多优越的技术性能,以下介绍一些主要的技术特点。

#### (1) 射频特性

蓝牙设备的工作频段选在全世界范围内都可以自由使用的 2.4GHz 的 ISM(工业、科学、医学)频段,这样用户不必经过申请便可以在 2400~2500MHz 范围内选用适当的蓝牙无线电收发器频段。频道采用 23 个或 79 个,频道间隔均为 1MHz,采用时分双工方式。调制方式为 BT=0.5 的 GFSK,调制指数为 0.28-0.35。蓝牙的无线发射机采用 FM 调制方式,从而能降低设备的复杂性,最大发射功率分为三个等级,100mw(20dBm),10mW(4dBm),1mw(0dBm),在 4-20dBm 范围内要求采用功率控制,因此,蓝牙设备之间的有效通信距离大约为 10-100m。

#### (2) TDMA 结构

蓝牙的数据传输率为 1Mbit/s,采用数据包的形式按时隙传送每时隙 0.625 us。蓝牙系统支持实时的同步定向联接和非实时的异步不定向联接,蓝牙技术支持一个异步数据通道,3 个并发的同步语音通道或一个同时传送异步数据和同步语音通道。每一个语音通道支持 64kbit/s 的同步语音,异步通道支持最大速率为 721kbit/s,反向应答速度为 57.6kbit/s 的非对称连接,或者是速率为 432.6kbit/s 的对称连接。

#### (3) 使用跳频技术

所谓跳频技术,简单来说就是将整个频带分成若干跳频信道,即使在单一链接的情况下,蓝牙芯片所操控的收发器也会按照一定的码序列(即具有规律性的、技术上称为“伪随机码”的数码集)不断地从一个信道“跳”转到另一个信道。而接收方亦按照同样的跳转规律进行信道切换,这实际上属于一种硬件加密手

段,除非第三方掌握了收发双方的切换信道规律,那么从理论上讲是无法获得完整信息的。而对干扰来说不可能存在按同样的规律介入的干扰源,跳频的瞬时带宽很窄,但通过扩展频谱技术使这个窄带宽成百倍地扩展成宽频带,使被干扰的可能变得很小,如此便可以保证传送的完整性。跳频是蓝牙使用的关键技术之一。对应单时隙包,蓝牙的跳频速率为 1600 跳/秒;对于多时隙包,跳频速率有所降低;但在建链时则提高为 3200 跳/秒。使用这样高的调频速率,蓝牙系统具有足够高的抗干扰能力,且硬件设备简单、性能优越。

#### (4) 蓝牙设备的组网

蓝牙根据网络的概念提供点对点和点对多点的无线连接,在任意一个有效通信范围内,所有的设备都是平等的,并且遵循相同的工作方式。基于 TDMA 原理和蓝牙设备的平等性,任一个蓝牙设备在主从网络(Piconet)和分散网络(Scatternet)中,既可做主设备(Master),又可做从设备 fSlaverl,还可同时既是主设备(Master),又是从设备(Slaver),因此在蓝牙系统中没有从站的概念,另外所有的设备都是可移动的,组网十分方便。

#### (5) 软件的层次结构

和许多通信系统一样,蓝牙的通信协议采用层次式结构,其程序写在一个 8mm\*8mm 的微芯片中。其底层为各类应用所通用,高层则视具体应用而有所不同,大体分为计算机背景和非计算机背景两种方式。前者通过主机控制接口 HCI(Host Control Interface)实现高、低层的连接,后者则不需要 HCI。层次结构使其设备具有最大的通用性和灵活性。根据通信协议,各种蓝牙设备无论在什么地方,都可以通过人工或自动查询来发现其他蓝牙设备,从而构成主从网和分散网,实现系统提供的各种功能,使用起来十分方便。

### 2.1.3 蓝牙网络模型(Bluetooth network model)

蓝牙网络系统中的常用名词:

Piconet (微微网): 两个或多个共用同一蓝牙信道的设备组成的网络被称为是一个微微网 (piconet)由于微微网中主动设备的地址长度为 3 比特,故一个微微网的主动成员数为 2-8 个。其中一个单元为 master unit 其它单元为 slave unit。

Scatternet (特殊松散网): 有重叠覆盖区域的多个微微网组成一个 scatternet。

Master unit (主单元): 即在一个微微网中其时钟和跳频顺序被用来同步其它单元的设备。

Slave units (从单元)：即微微网中不是 master 的所有设备。

Mac\_Add (主动成员地址)：用来区分微微网中各主动单元的长度为 3 比特的地址。

Park (暂停模式)：在微微网中与网络保持同步但不进行数据收发的一种工作模式。

Sniff and hold mode (呼吸与保持模式)：与网络同步但进入睡眠状态以节省能源的一种工作模式。

蓝牙网络模型基于邻近组网的原则，是对等(peer to peer)通信的一种。两个彼此靠近到一定程度的设备，可以自发地建立通信链接。标准 0 dBm 蓝牙无线设备的正常通信范围是 10 m，带有功放的 20 dBm 设备可以达到 100 m 左右。

### (1) 微微网

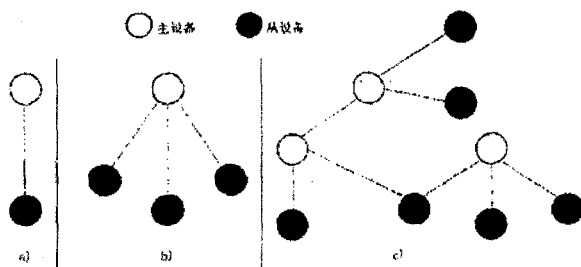


图 2-1 利用蓝牙技术构成的不同类型的网络

(a) 单个从设备构成的网络 (点对点)

(b) 多个从设备构成的微微网 (点对多点)

(c) 多个微微网构成的散射网

注：白色的小圆代表蓝牙网络中的主设备(Master)

黑色的小圆代表蓝牙网络中的从设备(Slave)

如果两个设备建立了蓝牙链接，其中一个设备将扮演主角角色(master)，另一个则扮演从属角色(slave)。角色的分配是在微微网形成时临时确定的，主控设备通常由发起通信的设备承担，而且这种主从角色也可以互换。一个给定的主控设备最多可以和 7 个活动的(active)从属设备和 255 个休眠的(parked)从属设备通信。一个单独的主控设备和临近与之通信的所有从属设备即组成了所谓的 piconet(惯称微微网)。图 2-1 中(a)(b)展示了蓝牙微微网的一般模型，(a)表示的是蓝牙网络中最简单的情形，即只有两个设备，它们之间是点到点通信；(b)表

示的是一个主设备和多个从属设备组成的蓝牙网络。在一个微微网中只能有一个主控设备，它的时钟和跳频序列被用来使该微微网中的所有从属设备与之同步。这些从属设备都与主控设备保持链接和通信，共享一个公共传输信道，并处于某一特定的基带模式，比如活动从属设备就可以进入呼吸(sniff)或保持(hold)模式等低功率节能状态。在邻近区域可能还有一些处于待机(standby)状态。在邻近区域可能还有一些处于待机(standby)状态的设备，它们未与主控设备连接，因而不是微微网的一部分。

## (2) 散射网

一个设备可以加入到多个微微网中并保持多个连接，当两个或多个微微网在时间和空间上部分重叠时，就形成了散射网(scatternet)，它的一般模型如图 2-2 中 (c) 所示。所有微微网需要遵循的原则同样适用于散射网，即每个微微网都有一个唯一的主控设备和一系列活动或休眠的从属设备，每个微微网的主控设备决定本网的跳频式样。通过轮流地与邻近的不同主控设备建立连接与同步，一个从属设备可以加入到多个微微网中，而且，一个设备可以在一个皮可网中作为主控设备，同时又在另一个皮可网作为一个从属设备，如图 2 中所示的。

每一个蓝牙设备被分配一个 48bit 的全世界独一无二的蓝牙设备地址(BD ADDR)，此地址服从 IEEE802 标准。此地址相当于蓝牙设备的身份，从地址信息中可以得到该设备为何种蓝牙设备、该设备的生产厂家等信息。

蓝牙技术还定义，在没有数据传输的情况下，可以采用低功耗模式来保持微微网的设备连接。低功耗模式共有三种:HOLD、SNIFF、PARK。主控单元可以将被控单元置于 HOLD 模式(从工作单元本身也需置于 HOLD 模式)，此时单元只有内部时钟在运行，主从设备间时钟保持同步，从设备仍然保留其激活态成员地址。在此状态下从设备可以自由的做其他事情如:扫描、寻呼、查询或加入另一个微微网工作。从 HOLD 模式转变后，数据传输立即得以恢复。有两个更省功率的模式，即 SNIFF 和 PARK 模式。在 SNIFF 模式下，设备在较低的频率下监听信道，减少工作周期。在 PARK 模式下，设备仍和微微网保持同步，但不参与业务，从设备释放其激活态成员地址，并偶尔监听通信情况，以便接收广播信息，同时可判断主设备是否有重新同步的要求。如果按功耗的递减方式将各种工作模式排列，SNIFF 模式具有最高的任务周期功耗最高，HOLD 模式次之，PARK 最低。

## 2.1.4 蓝牙协议栈的组成

蓝牙规范的核心部分是协议栈。蓝牙协议栈设计的主要原则就是尽可能利

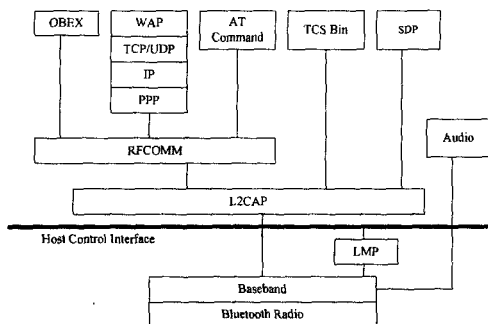


图 2-2 蓝牙协议栈结构图

用现有的各种高层协议，保证它们与蓝牙技术的融合以及各种应用之间的互通性，充分利用兼容蓝牙技术规范的软硬件系统。蓝牙协议栈允许多个设备进行相互定位、连接和交换数据，并能实现互操作和交互式的应用。为了实现互操作，在蓝牙设备上的对应应用程序必须以同一协议栈运行。不同应用可运行于不同协议栈，但是每一协议栈都使用同一公共蓝牙数据链路和物理层。蓝牙协议栈的完整结构图如图 2-2 所示。蓝牙体系结构中的协议可分为四层：

- (1) 核心协议: Baseband、LMP、L2CAP、SDP;
- (2) 电缆替代协议: RFCOMM;
- (3) 电话传送控制协议: TCP Binary、AT 命令集;
- (4) 可选协议: PPP、UDP/TCP/IP、OBEX、WAP、vCard、vCal、WAE。

除了上述协议层外，蓝牙协议还规定了主机控制接口(HCI)，它为基带控制器、连接控制器、硬件状态和控制寄存器提供命令接口，在蓝牙设备的主机和基带模块之间提供了一个通用接口。绝大部分蓝牙设备都需要核心协议(加上无线部分)，而其它协议则根据应用的需要而定。

## 2.1.5 蓝牙无线连接的建立

蓝牙设备在没有开始工作之前都处于就绪(Standby)状态。在此状态下，未被连接的设备定期的监听消息。监听分为两种类型:寻呼监听(Page scan)和查询监听(Inquiry scan)。

在寻呼监听的过程中,主设备用寻呼队列来监听。寻呼队列包含了设备所有可能的 32 个跳频频段,主设备每隔 1.28 秒在一个不同的频段发送从设备的设备接收码(device access code, DAC)。从设备在每个 1.25ms(监听窗口)内监听它的设备接收码。它的监听在一个跳频频段上完成,这个跳频频段由从设备中的硬件来决定。如果在某个时刻主设备收到了从设备的一个响应,就进入寻呼响应子状态,在此状态下主从设备交换数据。

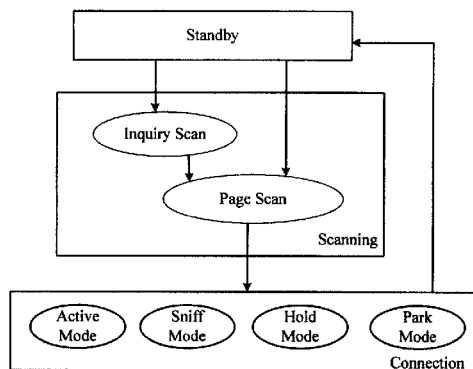


图 2-3 蓝牙无线连接的建立过程

寻呼监听是在设备地址已知的情况下采用的。如果地址未知,就采用查询监听。它与寻呼监听的过程类似,但在查询监听过程中,唯一的信息交换是主设备获得从设备的地址,当完成一次成功的查询监听后,主设备将进入寻呼监听过程来建立一个连接。

一个成功的监听过程完成后,会出现四种可能的连接状态:激活(Active)、保持(Hold)、探测(Sniff)和休眠(Park)。在激活方式下,可以进行数据交换。当一台蓝牙设备活跃在一个频段上时,它会被分配一个 3 个比特位的激活成员地址(AM—ADDR)。因为有 3 个比特,所以在一个微微网中任一时刻最多可以有 7 个从设备被激活(全零的地址被保留)。其余的三个状态都是节能方式。保持方式使设备保持自己的 AM—ADDR,并有时间完成监听等其他任务。探测方式减少了设备监听活动的次数,使设备的功耗降低,但保持自己的 AM—ADDR。休眠方式使设备放弃自己的 AM—ADDR,而被分配一个 8 比特位的休眠成员地址(PM—ADDR)。

## 2.2 蓝牙技术在多机器人通信中的应用

### 2.2.1 蓝牙技术在多机器人通信中应用的优越性

目前,多机器人之间的通信方式主要有现场总线方式、红外线方式等。现场总线技术多种多样,通信标准不统一,这使系统的开放性大打折扣。此外,在通信时还必须用电缆将各个机器人相连接起来,这在有时走线非常困难甚至是不可能的情况下,将成为其致命的缺陷。蓝牙技术的首要好处是消除了千头万绪、令人头痛的电缆线,大大缩小了机器的体积。红外线通信(Infra-red Deliverable Access-IrDA)方式是一种短距无线传输技术,它也是一种在多机器人通信中广泛应用的一种通信方式,其依靠红外线来传输数据,不象现场总线技术那样需要用通信电缆。但是它容易受到通信距离的限制,也容易受到干扰,而且传输方向的定向角只有30度。蓝牙(Bluetooth)技术是一种小范围内的无线通信规范技术,它虽然也是一种短距无线通信的技术,但是它依靠的是介于声音和红外线之间的电磁波。由于技术目标和传输媒介的不同,红外线和蓝牙在基带和射频部分(物理和数据链路层)上有很大的差别,也正是这些差别使得红外线技术和蓝牙技术在性能上有着很大的差异。

从表 2-1 中我们可以看出, IrDA 具有这样一些优点:数据传输速率高,最大时可以达到 16Mbit/s,适合于传输容量较大的数据文件和多媒体数据流;红外线发射角度较小,有一定的物理传输上的安全性。但是, IrDA 同时也存在着一些不足,其主要缺点是:传输距离短,一般为 1 米左右,受视距影响;要求通信设备的位置固定;点对点的传输,无法灵活地组成网络。与 IrDA 相比,蓝牙无线传输的优势在于:使用全向天线,更容易发现设备;采用快跳频和短分组技术,具有很好的抗干扰能力,数据通信非常安全;支持终端的移动性;传输速率设计为 1MHz,以时分方式进行全双工通信;信号传输不受视距的影响;支持点对多点的连接,易于组网。蓝牙相对于 IrDA 的这些优势又非常的适合机器人,因此,将蓝牙技术应用在机器人系统相对于其他的通信技术有着许多的优越性。

|        | IrDA(红外线)技术                        | Bluetooth (蓝牙) 技术            |
|--------|------------------------------------|------------------------------|
| 传输媒介   | 红外线                                | 2.4GHz, FH-SS                |
| 天线     | 30° 角                              | 全向                           |
| 移动性支持  | 不支持                                | 支持                           |
| LOS 限制 | 有                                  | 无                            |
| 调制方式   | 4PPM                               | FSK                          |
| 双工方式   | 半双工                                | 全双工                          |
| 节电模式支持 | 支持                                 | 支持                           |
| 发射功率   |                                    | 1mW/100mW                    |
| 覆盖距离   | ≤1m                                | 10m/100m                     |
| 连接方式   | 点对点                                | 点对点/点对多点                     |
| 数据传输速率 | 9.6kbit/s-16Mbit/s<br>4Mbit/s 为典型值 | 最大为 1Mbit/s 每个<br>Piconet 内。 |

表 2-1 红外线和蓝牙在基带和射频部分对比

此外, 蓝牙技术的通用性, 将使其应用在多机器人通信中具有很好的开放性。一方面, 集成“蓝牙”的机器人, 将自动搜索“蓝牙”, 如能开发机器人统一的开放性交互协议, 那么机器人之间“蓝牙”交互就如同人与人之间自然语言交互一样开放和简洁, 这在机器智能语音交互水平不高的情况下, 无疑具有很大的优势。另一方面, 蓝牙技术解决了机器人入网的最后十米的问题, 通过通用性“蓝牙”入网比通过专用网络适配器更具开放性。

### 2.2.2 蓝牙技术应用在分布式多机器人系统的问题

基于蓝牙技术的诸多优点以及广阔的应用前景, 本文考虑将蓝牙技术应用在多机器人通信领域的情况。针对多机器人的组织结构, 从控制的角度分析, 多机器人系统主要有二种控制方式:

(1) 集中控制方式。在多机器人系统中, 存在一个主控制器(主机), 各个机器人通过自身携带的各种传感器收集周围的信息, 并将这些信息反馈给主机。主机接收到这些数据并负责进行处理, 根据其策略库进行策略选择和推理, 然后依据功能库确定每个机器人的具体行为, 并将控制命令发送给每个机器人。每个机器人根据主机传送过来的命令进行活动, 并通过速度控制器控制

运动速度, 根据自身传感器的数据进行自动避障等。各个机器人将根据主机的统一约定决策, 完成一定的合作任务。

(2) 分布控制式。系统中不存在主机, 每个机器人具有许多自主性。每个机器人则通过自身的传感器获取信息, 根据自身策略库进行策略选择和推理, 通过通讯系统与其他机器人进行通信, 多个机器人通过彼此之间的相互协调来完成一定的合作任务, 即所有计算、决策和控制都由机器人自身完成。

与集中控制式相比, 分布式控制式具有以下优点: ①具有较强的环境适应能力, 因为逻辑的、语义的、时间和空间的分布性, 使分布式系统可针对不同的环境, 提出各种选择; ②扩充式的开发与管理, 分布式系统中的各个单元可由特定的领域专家独立地开发, 它实际上是可扩充的; ③高效率, 并行处理可提高计算与推理的速度; ④高可靠性, 由于采用了冗余、互检等技术。然而, 集中控制式也有其自己的优点, 系统中智能体的结构相对比较简单, 系统易于设计与实现, 而且集中控制式在理论和实际应用等方面都较分布式成熟。总而言之, 集中式和分布式各有千秋, 各有其适合的应用领域, 集中式结构比较适合紧密协调工作方式, 系统主要由 *Reactive Agent* 组成; 分布式结构比较适合松散协调工作方式, 系统主要由 *Deliberate Agent* 组成, 具有较高的智能和自治力。

在分布式多机器人中, 各个机器人之间相互通信、彼此协调, 共同完成复杂控制作业任务, 该系统不仅具备一般分布式系统所具有的资源共享、易于扩张、可靠性强、灵活性强、实时性好的特点, 而且各机器人通过相互协调、相互协作可解决大规模的复杂问题, 克服了建立一个庞大知识库所造成的知识管理和扩展的困难, 使系统具有很强的鲁棒性、可靠性和自组织能力。

在本论文讨论的多机器人系统中, 各个机器人具有很好的独立自主性和一定的智能性, 每个机器人都安装有蓝牙通信系统, 彼此之间通过蓝牙技术进行通信, 组成一个分布式的多机器人系统。

通常, 多个蓝牙设备共存于一定的区域范围内的时候, 它们之间通过查询和响应等手段建立起一个微微网 (*Piconet*), 这个微微网可以认为是一个静态的蓝牙网络模式。因为, 在这种模式中, 网络结构关系没有明显的动态特性, 网络中主设备和从设备的关系较为固定。如果将这种静态的蓝牙网络模式不加以改进的使用在分布式多机器人系统时, 将会出现以下的三个主要问题:

①不能充分体现分布式多智能体系统的基本特征——系统中各智能体在关系和功能上是平等、自主的。在蓝牙设备组成的微微网 (*Piconet*) 中, 所有的

从设备与主设备之间的通信都由主设备控制, 1 台从设备与另 1 台从设备通信的唯一途径也是通过主设备, 所以, 在一个微微网中还是存在着较为明显的主从关系。然而, 对于分布式多机器人而言, 每个机器人在关系上是对等的, 都要求具有很强的自主性, 不存在较明显的主从关系。因此, 分布式多机器人系统的基本特征在这种蓝牙网络模式中无法充分体现出来。

②增加了系统的不稳定性。在一个微微网中, 主设备的作用是非常重要的, 它控制和管理着整个网。静态的蓝牙网络模式中, 主设备的关系较为固定, 不会被别的设备取代, 如果主设备突然失效或移出蓝牙通信范围, 而其他的从设备又不能取代它成为主设备, 这样将会导致整个网络的瘫痪或造成整个通信系统的不稳定。

③网络资源利用率不高。在微微网中, 1 台从设备与另 1 台从设备通信的唯一途径是通过主设备, 这就意味着 1 个智能体与另 1 个智能体通信, 首先必须将数据传输给主智能体, 然后通过主智能体转发给需要通信的从智能体, 这样增加了主智能体的载荷。随着网络通信数据量的增加, 主智能体的容量达到极限, 这时会很容易发生通信拥塞。网络通信拥塞的发生将导致网络性能的急剧下降, 严重地影响和制约了蓝牙网络资源的有效利用。

## 2.3 一种适合于分布式多机器人系统的蓝牙网络及其实现

为了克服上述静态蓝牙网络模式应用在分布式多机器人系统中存在的问题, 可以在静态蓝牙网络模式的基础上进行一些改进, 使其变成一种动态的蓝牙网络模式。动态的蓝牙网络模式与静态的蓝牙网络模式的最大区别是: 在动态的蓝牙网络模式中网络中设备之间的主从关系是经常变换的。正是由于动态蓝牙网络模式的这个特点, 使得它能很好的克服上述三个主要问题, 更加适合分布式多机器人系统。基于这一思想, 提出了一种动态蓝牙网络模式——令牌式蓝牙网络模式。

令牌式蓝牙网络模式借鉴了 IEEE 802.4 标准——令牌总线和 IEEE 802.5 标准——令牌环的基本思想, 将它与蓝牙技术的传输方式结合起来形成的。它的核心思想是: 微微网中的每个成员通过平等的竞争或按照一定的规则都可以成为 Master, 即系统中的 Master 不是固定的。也就是说, 微微网中的每个成员都可以通过合理的、有序的竞争成为 Master, 并管理和控制着整个微微网, 和一个或多个 Slave 相互通信。因此, 微微网中的各个成员之间不存在固定的、不

变的主从关系，只是一种暂时的、常变的主从关系，从整体上来看每个成员在关系上都是平等的，这充分体现了分布式智能体系统的平等性。

根据蓝牙规范，生成微微网的设备是主设备，然而，当从设备想成为主设备时可以进行主从切换。但由于微微网的参数是根据主设备的设备地址和时钟确定的，主从切换本质上又是一个微微网重新定义的过程，所以，主从切换可看作一个微微网的切换。切换后的微微网参数根据先前的从设备的设备地址和时钟确定。结果，微微网中其他没有涉及切换的节点要移到新的微微网中来，改变它们的定时和跳频方案，要在从设备之间交换新微微网的参数。

总之，主从设备间切换有两个步骤：首先是相关的主从设备之间的切换，之后是微微网中所有设备的微微网切换。注意切换过程中，处于休眠(Park)状态的从节点要唤醒，改变微微网的参数，之后使用新的微微网参数再进入休眠(Park)状态。

因此，依据蓝牙规范中主从设备间的切换过程，本论文提出的令牌式蓝牙网络模式的实现机制如下：在微微网中，若一个 Slave 要与另一个 Slave 通信进行时，可首先让其成为微微网中的 Master，然后按照蓝牙技术的 Master/Slave 通信模式完成通信。

下面以 8 个独立的机器人为例，运用这种动态蓝牙网络模式，使 8 个机器人组成真正意义上的分布式多机器人系统，如图 2-4 所示。假设：8 个具有蓝牙功能的独立机器人，在蓝牙技术有效的范围内 (10m/100m)，要求组成一个分布式多智能体系统，相互协作完成某一合作任务。

(1) 首先，建立一个网络使它们彼此相联系，组成一个大的系统。在蓝牙微微网没有建立之初，每个智能体都是平等的，通过一定的竞争机制或按照一定的规则让 8 个机器人中的一个先成为主设备，并对周边设备发出查询信号，识别并控制和管理着其他 7 个机器人，这样就组成了一个以它自己为核心的微微网。

(2) 然后，如果有一个 Slave 想跟另一 Slave 相互通信，而不是与 Master 通信时，它可以向 Master 发出一个主/从角色切换的请求(LMP\_switch\_req)，希望成为网络的主设备。当主设备接收到这个请求时，而此时它没有信息需要传送时，就接受切换(LMP\_accepted)，否则拒绝切换(LMP\_not\_accepted)。当这个 Slave 从 Master 得到接受切换(LMP\_accepted)响应时，就意味着它得到了一个 Master 传过来的令牌，这个令牌具有能使其成为新的 Master 的权利。当这对

Master/ Slave 完成角色切换程序后, Slave 就成为了一个新的微微网中的 Master, 它将完成与其余 7 个 Slave 的信息交换, 并控制和管理着整个网络。

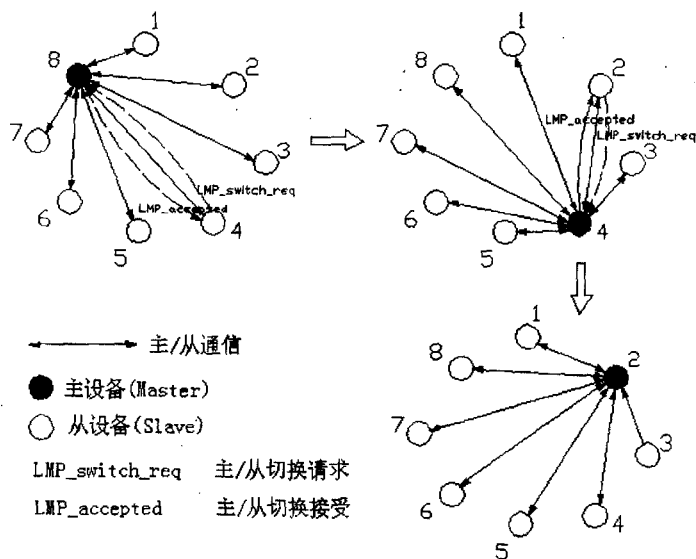


图 2-4 动态蓝牙网络模式示意图

(3) 最后, 网络中各个设备反复的重复着第 2 步的操作, 这样蓝牙网络中主设备的所属动态的在网络中各设备循环了, 因此, 整个网络从微观瞬时的角度来看是静态的, 主从关系明显的蓝牙网络模式, 但是从宏观的角度来看, 整个网络就变成了一种动态的, 网络中各个设备关系平等的蓝牙网络模式。

然而, 在这种新型的令牌式蓝牙网络模式中隐含了这样一个问题: 如果一个机器人在当它是微微网的 Master 时, 突然不工作了或者超出了蓝牙通信的有效范围, 这样将无法响应 Slave 得到令牌的请求, 致使整个系统瘫痪。这个问题的解决可以采用有限等待法, 即想得到令牌的 Slave 在没有得到 Master 的响应后, 重新发送请求, 然后继续等待回复; 若如此反复有限次数达到规定的限度时, 仍然无法得到回复, 就认定 Master 无法正常工作, 续而查询和唤醒其他机器人, 进行组建一个新的微微网。

在令牌式蓝牙网络模式的实现中,软件设计是技术实现的关键,下面(图 2-5)所示为令牌式蓝牙网络模式程序流程图,通过它可以实现令牌式蓝牙网络模式。

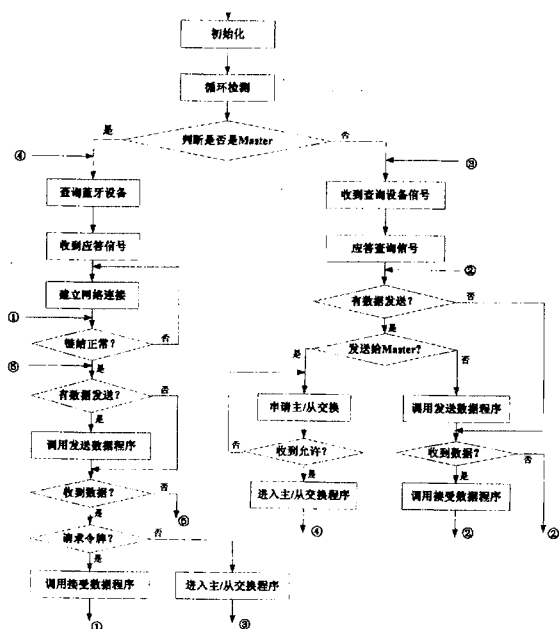


图 2-5 令牌式蓝牙网络模式的流程

## 2.4 本章小结

本章简要的介绍了蓝牙无线通信技术的概念、技术背景和特点、协议栈的组成及无线连接的建立等等,随后探讨了蓝牙技术应用在分布式多机器人系统时将会出现的几个问题。针对这些问题本文提出了一种新的蓝牙网络模式——令牌式网络模式,并详细地叙述了这种新的蓝牙网络模式的基本原理及其实现。这种令牌式网络模式结合了蓝牙无线通信的技术特点,克服了蓝牙技术应用在分布式多机器人系统中存在的问题,使其可以成为蓝牙技术应用在分布式多机器人系统时一种有效的解决方式。

## 第3章 机器人蓝牙通信系统的设计

### 3.1 蓝牙通信系统开发的基本思路

开发一个蓝牙通信系统之前,非常有必要对蓝牙通信系统的开发过程和基本思路有一个初步的了解,这样开发才能有步骤的、快速有效的进行。下面简要的介绍蓝牙通信系统开发的开发过程:首先,对蓝牙相关的规范和协议有一个初步的了解,蓝牙的规范包括协议的核心部分和蓝牙的应用剖面(用户模型),蓝牙规范的内容非常丰富,然而对整个协议进行全面地了解客观上难以实现,因此,可以先从一些简单的介绍开始。从整体上对蓝牙的结构体系有一个较为全面的了解后,再根据需要开发的蓝牙通信系统的具体要求和自身的开发条件,确定一种适合自己的开发方案。在确定了开发方案后,有目的地选择开发方案中用到的相关的协议和硬件接口进行专门研究;最后,进行确定具体的实现和调试。

蓝牙技术应用开发可以从不同的协议层入手。目前主要有两种蓝牙通信系统开发方案:一种是直接从蓝牙子系统做起,涉及到射频、基带等硬件协议层。另一种是基于 HCI 协议层(3.2 节有详细介绍)的蓝牙技术应用开发,这种开发采用了集成蓝牙子系统的全部或部分功能的蓝牙模块,屏蔽了射频、基带两个硬件协议层,可以直接在 HCI 基础上进行开发。这两种方案的原理和过程将在下面分别作详细的介绍。

| 公司名称                   | 产品号       | 集成的功能 |          | 支持的 HCI 传输层 |
|------------------------|-----------|-------|----------|-------------|
|                        |           | 链路控制  | HCI 驱动程序 |             |
| Ericsson               | ROK101007 | 是     | 是        | USB UART    |
| TI                     | BSN6030   | 是     | 是        | UART        |
| Lucent                 | W7400     | 是     | 是        | USB UART    |
| Alcatel                | TBD       | 是     | 是        | UART        |
| National Semiconductor | LMX5001   | 是     | 否        | 没有          |
| Silicon Wave           | SiW1601   | 是     | 否        | 没有          |

表 3-1 部分公司推出的蓝牙模块

表 3-1 是一些公司推出的蓝牙模块。为了后面讨论的方便，我们将这些蓝牙模块分成 2 类。第 1 类为只实现了链路控制功能的模块，第 2 类为链路控制与嵌入式 HCI 驱动功能均实现的模块。这 2 类模块的主要不同之处是，第 2 类包括一个 RISC(精简指令集计算机)处理器，实现链路控制和 HCI 功能，而第一类的 RISC 则不执行 HCI 功能。选用哪一类蓝牙模块，要根据实际情况而定。

### 3.1.1 蓝牙通信开发方案一：

如果我们选用只集成链路控制功能的蓝牙模块，同样实现了射频与基带的功能，但是，它不提供 HCI 传输层接口和嵌入式 HCI 驱动程序。由于此类模块的接口一般不具有通用性，所以，利用这种模块进行开发，必须设计接口功能转换电路。

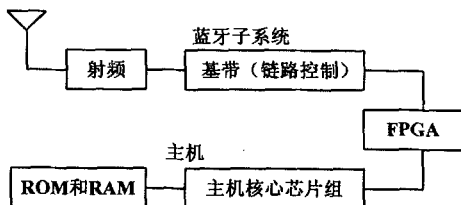


图 3-1 只集成链路控制功能的蓝牙模块硬件开发方案

这种接口功能转换电路是相当灵活的，可以转换为 HCI 协议层定义的 USB、UART 或 RS232 接口，也可以转换为 PCI 等其它 I/O 总线格式。由于它在接口转换方面具有高度的灵活性，因此，可以简化蓝牙模块与主机端的硬件设计。这时，我们可以利用 FPGA 的现场可编程特性，完成主机与蓝牙模块的接口功能转换，不需要两端具有对称的 USB 或 UART 接口和驱动程序。虽然，这种开发模型省掉了 HCI 协议层中的传输部分，但是并不违背蓝牙的协议模型。因为这种 HCI 传输功能，本身就是蓝牙协议实现的一种过渡，是以蓝牙子系统与主机

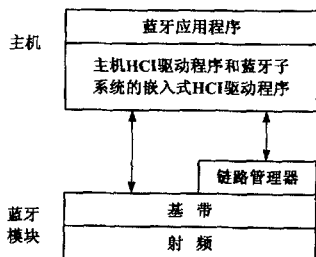


图 3-2 只集成链路控制功能的蓝牙模块软件开发方案

具有对等的传输驱动程序为基础的，并不对蓝牙数据帧格式产生影响。图 3-1 为硬件开发方案。

由于这种蓝牙模块不包含嵌入式 HCI 驱动程序，所以嵌入式 HCI 驱动程序的功能将转嫁给主机实现。这样，与后一种开发模式相比，主机 HCI 层驱动程序要复杂一些，因为需要增加嵌入式 HCI 驱动程序所执行的一些功能。此类蓝牙模块的 RISC 不执行 HCI 功能，因此，模块中的内存要求有所降低。图 3-2 为软件开发方案。

### 3.1.2 蓝牙通信开发方案二：

如果我们选用集成了链路控制与 HCI 驱动功能的蓝牙模块，那么就可以在一个比较完整的平台上进行开发。这些蓝牙模块不仅提供 1 个 RISC 处理器或者多个 HCI 传输层接口，而且提供了 HCI 与链路管理器嵌入式软件。使用这种类型的模块，硬件上的工作就是进行蓝牙模块与主机之间的传输接口连接。如果主机具有 USB 或 UART 接口，在蓝牙模块与主机信号电平兼容的情况下，接口连接可以不需要其它辅助硬件电路。许多情况下，USB 或 UART 接口集成在主机的核心芯片上，所以可以实现蓝牙模块与主机的无缝接口。

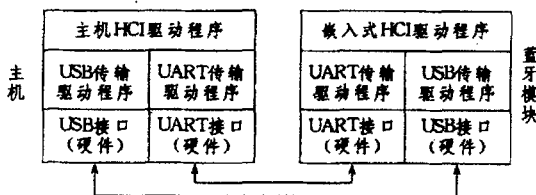


图 3-3 集成了链路控制与 HCI 驱动功能的蓝牙模块开发方案

图 3-3 为开发方案。这种模型下的蓝牙技术应用开发，主要工作集中在蓝牙主机端软件实现上，包括 HCI 驱动程序与传输驱动程序。正是由于这种蓝牙模块实现了嵌入式 HCI 协议，所以应用开发可以直接从 HCI 层开始，避免了基带与射频的硬件实现，是一种全软件式的开发模式，开发成果具有较好的可移植性。通过封装 HCI 协议层，可以生成标准的 HCI 接口函数，为上层应用程序的开发提供一个完整的平台。

### 3.1.3 两种开发方案的比较:

方案 1 需要在主机端实现 HCI 高层驱动程序与 HCI 低层驱动程序的功能, 硬件部分要进行接口功能的转换实现。所以, 方案 1 对硬件要求较高, 由于完全使用硬件进行主机与蓝牙模块通信, 所以速度也较快。但是, 此种方案开发工艺要求比较高, 开发过程比较复杂, 因此开发周期比较长。

方案 2 只需要在主机端进行软件编程, 实现 HCI 高层驱动程序与传输驱动程序的功能; 硬件部分视情况而定, 如果主机与蓝牙模块信号电平匹配, 可以实现接口间的无缝连接, 如果信号电平不匹配, 只需增加接口电平转换电路(并不是实现接口功能转换的电路)。这种方案对硬件要求不高, 由于主机与蓝牙模块之间的通信有传输驱动程序参与, 所以速度较慢, 但是开发实现比较容易, 可以大大缩短开发周期。

本课题研究的机器人蓝牙通信系统采用的就是后者方案, 详细的硬件、软件实现介绍见 3.3、3.4 节。

## 3.2 蓝牙通信协议中主机控制器接口 (HCI) 简介

如何基于 HCI 层进行蓝牙技术应用开发, 首先必须了解 HCI 涉及到的相关内容, 因此有必要简要介绍一下蓝牙通信协议中主机控制器接口

(HCI)。我们可以将其 HCI 划分为 HCI 软件与 HCI 硬件 2 部分讨论。

### 3.2.1 HCI 的软件

为了让蓝牙模块与主机, 甚至是让不同厂商的蓝牙模块能够互通, SIG(蓝牙特别兴趣组)定义了一个标准接口与模块中的主机控制器进行通信。SIG 还定义了一个事务型通信协议, 用于在主机和主机控制器间运送信息。这种主机与主机控制器之间的标准接口和它们之间相应的通信协议

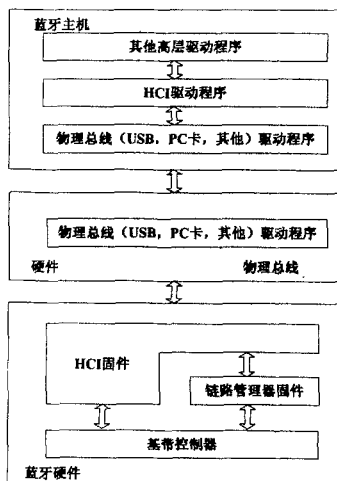


图 3-4 HCI 软件层概述

一起被称为 HCI(主机控制器接口)。HCI 提供了一种访问蓝牙硬件能力的通用接口。图 3-4 表示了蓝牙模块与蓝牙主机之间程序上的层次结构。本文所提到的主机是一个广义的概念,可以是 CPU 为核心的计算机,也可以是 MCU 为核心的控制电路,二者用途各异。MCU 为核的控制电路适用于嵌入式应用开发(即蓝牙终端产品,如蓝牙耳机),CPU 为核心的计算机适合于人机接口软件开发(如用户通过蓝牙设备接入局域网,浏览网页)。HCI 固件通过访问基带命令、硬件状态寄存器、控制寄存器以及事件寄存器实现对蓝牙模块的 HCI 命令。在主机系统的 HCI 驱动程序和蓝牙的硬件 HCI 固件之间可能存在几个层次,也可以

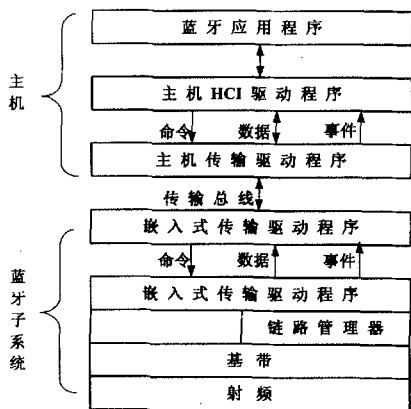


图 3-5 蓝牙 HCI 软件结构

可以直接相连,在本课题设计的系统中就采用的是后者。蓝牙主机与蓝牙模块之间数据传输的过程也就是主机上的 HCI 驱动程序与蓝牙模块的 HCI 固件交换数据和命令的过程。

图 3-5 为蓝牙 HCI 软件结构。HCI 软件结构可以分为两大平面结构:数据平面与控制平面。数据平面负责数据通过链路的转移,控制平面负责链路

的管理与控制。从控制平面来看,主机端的 HCI 驱动程序(HCI 高层驱动程序)与蓝牙子系统的嵌入式 HCI 驱动程序是不完全对称的。主机端的 HCI 驱动程序,一方面通过接口被蓝牙应用程序调用(本文所提到的蓝牙应用程序是相对于 HCI 层而言的,这种应用包括 HCI 层以上的蓝牙协议软件,或是直接基于 HCI 层的客户应用程序),实现对上层应用的承载;另一方面实现了协议中的 HCI 功能集,使主机可以向蓝牙子系统发送 HCI 指令,或接收子系统返回的 HCI 事件。蓝牙子系统的嵌入式 HCI 驱动程序完成的也是两个功能:一是实现了协议中的 HCI 指令功能集,从而可以接收主机端 HCI 驱动程序发送的指令,或是向主机返回相应的 HCI 事件;二是对基带和链路管理器进行控制实现物理链路的建立,通过 HCI 事件将相关结果返回给主机端 HCI 驱动程序。从数据平面来看, HCI

驱动程序的实现功能和方式与控制平面极其相似，只不过主机端发送的是数据，并非 HCI 指令，而且数据的传送必须在链路建立之后才能进行。

### 3.2.2 HCI 的硬件

图 3-5 中的传输驱动程序实际上就是对 HCI 传输硬件设备的驱动。在蓝牙规范的描述中，蓝牙模块与主机之间共有 3 类数据转移的方式，每一种数据在硬件接口均具有一定的封装格式，分别是由 3 种传输层支持。目前的 3 个 HCI 传输层分别为 UART、RS232 和 USB。

RS232 与 UART 传输层都是利用 UART 进行串行通信，但是二者应用环境有所不同。当蓝牙子系统与主机位于同一印刷电路板时，可以使用 UART 传输层，这时传输信道的误码率可以达到通信质量的要求。虽然 UART 并未规范电气特征，但是在信号电平兼容的情况下，可以实现主机与蓝牙子系统的无缝接口，简化了硬件电路。如果信号电平不能兼容，可以在蓝牙子系统与主机之间加入适当的电平转换电路，从而实现设备间的正常通信。在 UART 传输方式下，主机与子系统之间不使用波特率协商机制。

当蓝牙模块与主机位于同一印刷电路板时，可以使用 UART 传输层，这时传输信道的误码率可以达到通信质量的要求。本课题采用了 UART 传输层。虽然 UART 并未规范电气特征，但是在信号电平兼容的情况下，可以实现主机与蓝牙模块的无缝接口，简化了硬件电路。如果信号电平不能兼容，可以在蓝牙模块与主机之间加入适当的电平转换电路，从而实现设备间的正常通信。

### 3.2.3 HCI 的流控制

蓝牙主机与蓝牙模块之间采用数据流的方式进行通信与控制，这就涉及到一个数据流控制的问题。流控制是 HCI 协议中最重要的部分，只有了解了流控制的方法和方式，才能有效实现蓝牙的数据通信。HCI 流控制用在主机到主机控制器的方向，在发送时，主机要把 ACL 数据发到数据缓冲区，因 HCI 流控制的作用是避免发送到数据缓冲器的数据溢出；也就是说主机要对主机控制器的数据缓冲器进行管理。

主机通过发送 `Read_Buffer_Size` 指令进行初始化。通过该指令返回的参数可以确定从主机发往主控制器的 HCI ACL 和 SCO 数据分组(不包括报头)的最大长度。另有两个返回参数表示主控制器为等待传输可以缓存的 HCI ACL 和

SCO 数据分组的数量。在只有一个链接或处于本地回送的情况下，主控制器利用已完成数据分组事件控制从主机发来的数据流。事件分组包括一个链接句柄列表，以及从事件返回后已经完成发送的 HCI 数据分组的应答数量。如果该事件没有返回指定链接句柄，则从链接创建开始。发送完成是指数据分组的传输、溢出和回送至主机。根据事件返回信息和存放在主控制器的 Read\_Buffer\_Size 指令返回参数，主机决定后面 HCI 数据分组发送哪一个链接句柄。每次发送 HCI 数据分组以后，主机都假定对应于链路类型的主控制器的一部分空闲缓存空间已被 HCI 数据分组占用。主机收到新的已完成数据分组事件，获取自上次事件返回以后减少的可用缓存空间大小后就可以计算当前实际可用缓存。当主控制器在其缓存中存放有 HCI 数据分组时，它必须向主机周期性持续发送已完成数据分组事件，直到所有 ACL 数据分组都已发送完毕或溢出。事件发送频率由厂商指定。注意：如果 SCO 流控制失效，则已完成数据分组事件号就不能在 SCO 链接句柄中进行报告（参见 Read/Write\_SCO\_Flow\_Control\_Enable）。

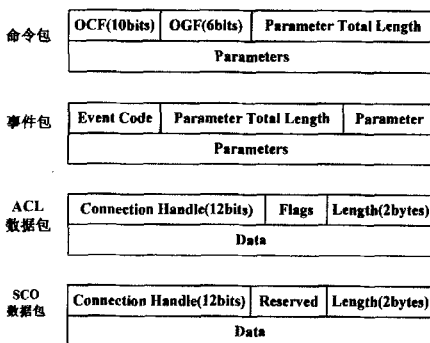


图 3-6 HCI 包格式

对于每一链接句柄，数据都应按照它在主机内的创建顺序，以 HCI 数据分组的形式发送到主控制器。主控制器也以相同的顺序传输从主机收到的数据。同样，从其他设备收到的数据也可作相同处理。这就意味着应在链接句柄的基础上排序。对于每一链接句柄，数据顺序应与其创建时保持一致。

在某种情况下，必须在主控制器到主机的方向上采用流控制。一般采用 Set\_Host\_Controller\_To\_Host\_Flow\_Control 指令关闭或打开流控制。如果流控制已打开，工作方式如上所述。初始化时，主机利用 Host\_Buffer\_Size 指令通

知主控制器发往主机的 HCI ACL 和 SCO 数据分组最大尺寸。该指令还包括其他两个参数,用以通知主控制器在主机数据缓存区中能够存储的 HCI ACL 和 SCO 数据分组的数量。主机就像主控制器利用已完成数据分组数量一样利用 Host\_Number\_Of\_Completed\_Packets 指令。Host\_Number\_Of\_Completed\_Packets 指令用于无流控制指令可用的情况下,只要存在链接或处于本地回送模式时就可以发送该指令。这就使得流控制可以以同样方式实现双工,而且不干扰正常指令流。

主机收到断开链接完成事件后,就可以认定相对于返回的 Connection\_Handle 而发送到主控制器的所有 HCI 数据分组都已溢出,而且相应的数据缓存已被释放。主控制器不必再以完成数据分组事件数量的形式将此通知主机。如果在从主控制器到主机的方向上采用流控制,主控制器将在发送 Disconnection\_Complete 后,认定主机收到 Disconnection\_Complete 时将释放已发送的 Connection\_Handle 所占用的缓存。主机不必再以 Host\_Number\_Of\_Completed\_Packets 的形式将该信息通知主控制器。

HCI 是通过包的方式来传送数据、命令和事件的,所有在主机和主控制器之间的通信都以包的形式进行。包括每个命令的返回参数都通过特定的事件包来传输。HCI 有数据、命令和事件三种包,其中数据包是双向的,命令包只能从主机发往主控制器,而事件包始终是主控制器发向主机的。主机发出的大多数命令包都会触发主控制器产生相应的事件包作为响应。包的格式如图 3-6。

HCI 模块根据协议规定,完成协议功能、封装 HCI 命令以及上层协议的数据,处理下层事件。HCI 命令事件处理模块完成命令的封装和事件的解析,在收到上层协议或应用的调用命令请求后,模块完成命令包的封装,而后调用发送函数将数据传到数据收发模块。当接收函数收到 HCI 事件时,调用 HCI 命令事件处理模块的事件处理函数,处理完毕后依据事件的性质,将响应传到上层协议或应用。HCI 数据处理模块完成 ACL 和 SCO 数据的封装处理,但对净荷不作任何解析和处理。收发函数主要完成与数据收发模块的通信,对收到的数据根据数据的类型,分别调用命令事件处理模块或数据处理模块予以处理。

### 3.3 机器人蓝牙通信系统设计

本机器人蓝牙通信系统采用蓝牙开发方案 2,即基于 HCI 层的开发。在充分了解了 HCI 层的硬件接口和软件协议之后,即可以开始进行蓝牙通信系统的

设计了。蓝牙通信系统的设计涉及到两个方面的设计：系统硬件设计和系统软件设计。

机器人蓝牙数据通信接口采用的蓝牙模块是 ERICSSON 公司的 ROK101008。蓝牙模块提供了 I2C、UART 和 PCM 等 3 个主机控制器接口，极大地方便了硬件设计。采用 UART 作为数据通信接口，当用 UART 进行数据通信时，蓝牙模块是作为一个数字电路终端设备(DCE, Data Circuit-terminal Equipment)，其串行传输速率可达 460 kbit/s。主机采用 AT89C51 单片机作为控制单元，利用 C51 和汇编语言实现蓝牙芯片的初始化、蓝牙链路管理命令的编辑、链路建立、链路监视、链路拆除以及数据的打包和拆包等功能。软件功能的实现与蓝牙协议 HCI(主控制器接口)联系紧密。

### 3.3.1 机器人蓝牙通信系统硬件的设计

机器人蓝牙数据传输终端实际上就是一个蓝牙无线调制解调器，其系统电路原理图如图 3-7。单片机通过 UART 传输给蓝牙模块，蓝牙模块将数据转变为特殊的蓝牙 RF 信号以无线方式发送出去；用户接收数据则是一个相反的过程。

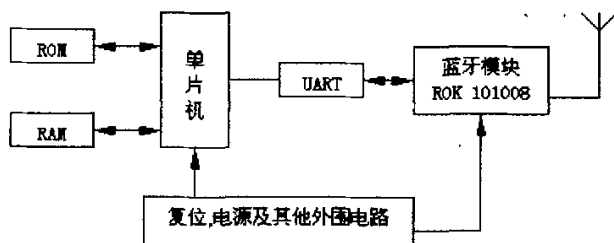


图 3-7 机器人蓝牙通信系统硬件组成框图

在整个系统中，CPU 主要完成蓝牙链路的建立和管理、用户安全管理以及数据的封装和拆包等功能；蓝牙模块主要完成蓝牙协议中 HCI 层以下各层定义的功能；由于蓝牙模块的工作电压是 3.3 伏，而单片机和其外围芯片的工作电压是 5 伏，因此，本数据传输终端还使用了电源变换和管理电路；为了便于数传终端的软件修改，采用 FLASH 芯片作为程序存储器，结合软件来实现终端的软件在线升级。

蓝牙模块是数据传输终端的重要组成部分，要完成全部蓝牙基带、射频以及部分 HCI 协议。本传输终端采用的蓝牙模块是 ERICSSON 公司的 ROK 101008，可以参见蓝牙模块 ROK101008 外形结构图（图 3-8、图 3-9）。ROK 101008 是 ERICSSON 公司 2000 年推出的蓝牙模块，目前该模块还没有完全定型，只是过渡型产品，其硬件和软件还在不断更新，我们采用的版本是 P3A。ROK101008 的组成框图如图 3-10，主要由三大功能模块组成：基带处理器、无

线收发模块和 FLASH, 配备少量的外围元件如音频编译码器、USB/UART 主机控制接口、电源电路等。基带处理器包含一个 ARM7 内核, 主要完成链路的建立和控制, 还要完成授权和鉴密以及密钥管理等功能。基带处理器还提供了 USB 口和 UART 口用于主机与模块交换信息。无线收发模块完成混频、滤波、功率放大等功能, PBA31301/2 最大能提供 4dbm 的发射功率, 一般通信距离约为 10 米, 符合 FCC 和 ETSI 标准。FLASH 主要用于存放 HCI、LM 等协议, 配合基带控制器完成其控制功能。

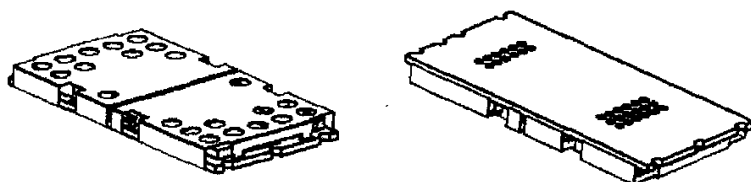


图 3-8 蓝牙模块 ROK101008 外形结构图 (1)

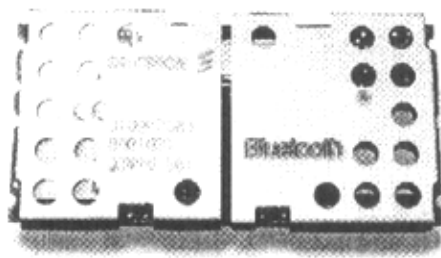


图 3-9 蓝牙模块 ROK101008 外形结构图 (2)

ROK101008 提供四种接口: UART、PCM、USB 和 IIC 接口。UART 口实际上是通过一个标准的 16C450 来实现的, 支持的波特率有 300、600、900、1200、1800、2400、4800、9600、19200、38400、57600、115200、230400 和

460800 比特/秒。UART 口有 128 比特的输入输出缓存。UART 使用了四个管脚, 其中 TXD 和 RXD 用于数据传输, RTS 和 CTS 用于流量控制。PCM 语音接口采用标准的 8KHZ 的抽样频率, PCM 数据可以是线性 PCM(13-16 比特)、A 律(8 比特)或 U 律(8 比特)PCM 编码。ROK101008 提供的 USB 口是一个从 USB 口, 服从 USB1.1 协议规范。数据通过双向口传输: D+ 和 D-。此外, 还有 WAKE-UP 和 DETACH 信号, 当主机处于休眠状态时, WAKE-UP 信号可以唤醒主机并通知主机收到连接请求。主机则可以使用 DETACH 信号指示蓝牙模块暂停数据传输。IIC 接口是 ERICSSON 公司自己独有的接口, 在蓝牙协议中并没有规定, 使用该接口时可以参见 ERICSSON 提供的文件。

蓝牙模块的 ANT 脚用于外接天线，其标称阻抗是 50 欧姆。蓝牙模块对于天线没有太多的要求，只是由于天线的方向图和增益不同时，会影响通信距离。通常，可以采用两种天线：一种是杆状单元天线，一种是直接印制在 PCB 板上的倒 F 型天线，用这两种天线通信时都可以取得成功。

蓝牙模块在正常工作时，VCC、ON、和 VCC-I/O 脚都应接高电平 3.3V，若在电路中，这三个管脚是连在一起的，则没有上电顺序的要求，否则必须遵守其上电顺序。首先连 GND，然后是 VCC，接着接通 ON 信号用于初始化内部时序，最后才是 VCC-I/O，为模块的各输入输出提供电源。关闭电源的顺序则相反，即按 VCC-I/O，ON，VCC 的顺序。RESET 信号用于初始化整个蓝牙模块。由于在芯片上电时 RESET 信号自动置低，所以在上电后可以不必再输入 RESET 信号。

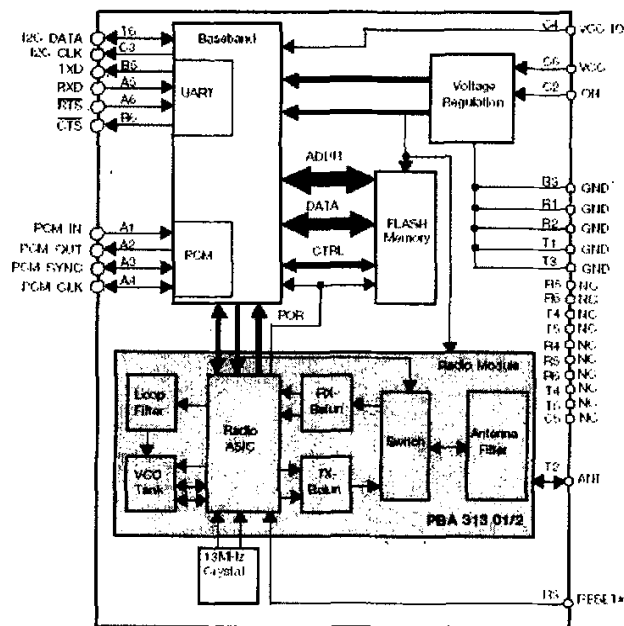


图 3-10 ROK101008 的内部组成框图

蓝牙模块提供的四种接口中，UART 是一种简单、易于实现的接口，当使用蓝牙模块实现简单的应用时，采用这种接口是合适的。我们在设计蓝牙模块的接口时，就采用了 UART 口，电路原理如附件 1 所示。蓝牙模块的所有 GND 脚都妥善接地，VCC、ON、VCC-I/O 同时连接在 3.3V 电源上，不用考虑上电顺序问题。ANT 脚外接阻抗为 50 欧姆天线。RESET 脚通过分压电阻网络连接到系统的 RESET 信号。

由于蓝牙模块采用 3.3V 电源，而其它芯片采用 5V 电源，因此，终端中采用了一个 DC/DC 转换电路 TPS7333 将 5V 电源转换为 3.3V。TPS7333 是 Texas 公司于 1999 年推出的高效率、固定电压转换芯片，输入电压为  $5V \pm 2\%$ ，输出电压为 3.3V，输出电流范围为 0-500mA，支持低功耗模式，在休眠状态时消耗电流仅 0.5uA。TPS7333 提供 8 脚 DIP 封装，其管脚名称可参见图中的 TPS7333。一脚是电源地 GND。2 脚是使能信号 EN，低电平有效。3、4 脚是电源输入，标称为 5V。5、6 脚是电压输出，标称为 3.3V。7 脚是输出电压监控 SENSE，该脚用于将输出电压反馈回芯片内部，使输出电压更加稳定。在一般应用情况下，SENSE 脚直接连在芯片的电压输出端，并且使连线尽可能的短，在某些情况下，为了保证电路中某点的电压最稳定(这点的电压必须是由 TPS7333 供电的)，可以将该点连接到 SENSE 脚，TPS7333 就能根据该点的电压情况调整输出，达到稳定该点电压的目的。8 脚复位输出管脚，在芯片上电时，RESET 脚输出低电平，延时 200ms 后，再输出高电平；在输入电压波动时，RESET 脚也将输出一个 200ms 的复位脉冲。该脚可以作为微处理系统的复位信号。

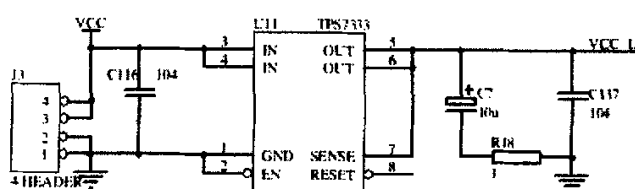


图 3-11 电压转换电路图

电压转换电路的原理如图 3-11。J3 是系统的电源输入，1、2 脚接地，3、4 脚输入 5V。C116 是 TPS7333 的输入滤波

电容，C7 和 R18 阻容网络用于稳定 TPS7333 的输出，TPS7333 的 5、6 脚输出为蓝牙模块提供 3.3V 电源。TPS7333 的 7 脚直接连接在输出端。

### 3.2.2 机器人蓝牙通信系统软件的设计

蓝牙数据传输通信软件主要完成蓝牙芯片初始化、蓝牙链路管理命令的编辑、链路建立、链路监视、链路拆除以及数据的打包和拆包等功能。从整体上，蓝牙通信系统软件可以分为五个模块：单片机初始化模块；链路建立模块；链路监控模块；数据传输模块和链路拆除模块。蓝牙数据通信系统软件总程序流程图见图 3-12，从这个流程图中可以看出各个模块之间的连接关系。

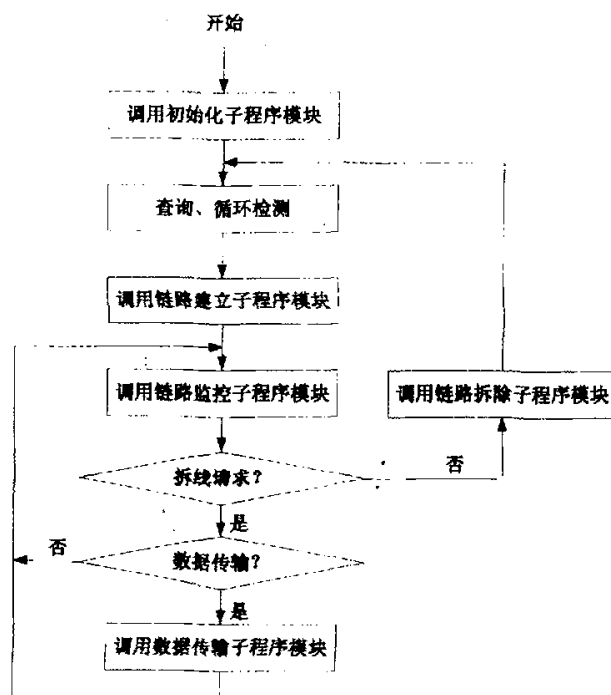


图 3-12 蓝牙数据通信系统软件总程序流程图

### (1) 单片机初始化模块:

单片机内主程序首先初始化串口，如设置波特率为 57.6kb/s，选择工作方式 1 等。在串口初始化完成后，主程序按图 3-13 所示的流程初始化蓝牙从单元，使该模块处于查询扫描、呼叫扫描允许状态，以便在后续的连接建立进程中能正确响应主控机的 HCI-Inquiry、HCI-Connection 命令请求，以完成主从机间的 ACL 链接，实现数据和控制指令的传递。

此外，根据蓝牙设备通讯的特点，在本系统中，主程序在主循环中采用非中断方式发送 HCI 命令分组和 ACL 数据分组，以响应其他蓝牙设备的请求。考虑到蓝牙从设备事件激活、与主控机数据交互的随机性，我们采用串口中断的方式接收 HCI 事件分组、HCI ACL 数据分组，并根据接收到的控制指令和控制参数调用相应的程序，完成相应的动作。

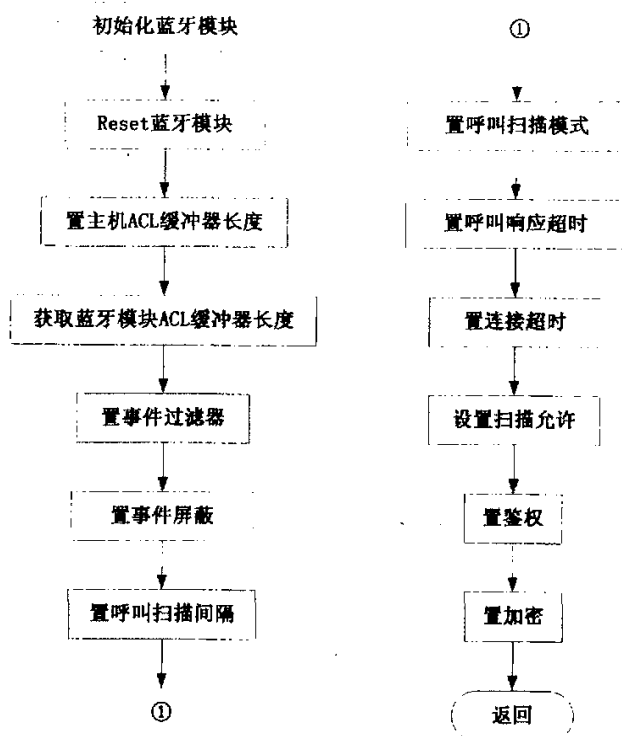


图 3-13 单片机初始化模块流程图

## (2) 建立链接模块:

建立链路模块是数据传输的基础,该模块负责对蓝牙主控制器进行控制,建立主节点和从节点之间的链路。在初始化蓝牙模块完成后,单片机即发出 HCI-Inquiry 查询命令启动主单元的查询进程,主单元一旦在查询进程中接收到从单元的应答,即激活查询结果事件。在串行通讯模块接收到一个完整的查询结果事件分组后,阻塞函数 Wait(如图 3-13 所示)将激活 RecData 事件,通知主控机应用程序获取应答的从单元设备数以及与从单元设备相对应的 BD-ADD。随后,单片机发出 HCI-Create-Connection 链接命令分别与对应的从单元建立 ACL 链接。考虑到传输数据的安全性,系统在数据链路层设置了鉴权和加密,在验证完成后,链接双方将密钥即链接字、链接句柄以链接字通知事件和链接完成事件通知双方主机,为将来传递 ACL 分组提供了技术保证,具体流程如图 3-13 所示。

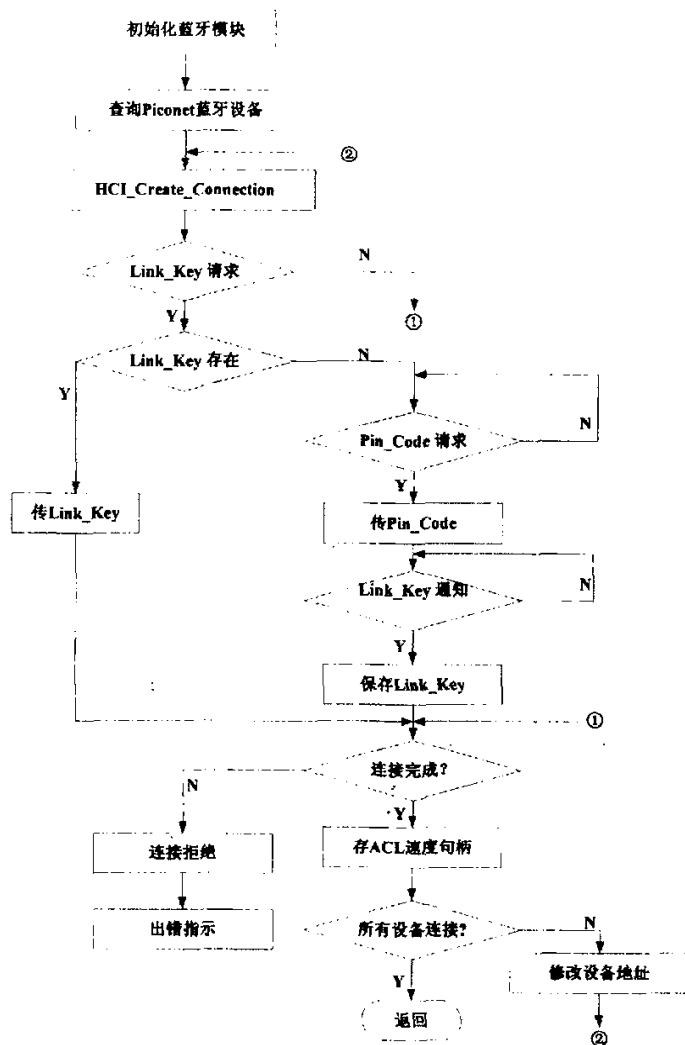


图 3-14 建立链接模块程序流程图

### (3) 链路监控模块

可能有多种原因造成连接的中断，因此，在链路的里端进行监控是非常必要的。一旦发生链路断开事件，则调用链路建立子程序，重新建立链路。

### (4) 数据传输模块

数据传输模块主要负责主节点和从节点之间的用户数据交换。该模块主要实现从缓冲区中读取数据、数据分组拆包以及数据打包、数据送入缓冲区发送等功能。

#### (5) 链路拆除模块

链路拆除模块主要完成已连接链路的断开和蓝牙模块的复位，使蓝牙设备处于待机状态。

### 3.3 本章小结

这一章首先简要介绍蓝牙开发的基本思想，随后叙述了目前比较常用的两种蓝牙开发方案，并对这两种开发方案进行了简要的比较，经过权衡各方面条件，在我们设计的机器人蓝牙通信系统中采用了第二种开发方案。然后，本章详细地介绍了蓝牙开发必须掌握的 HCI 协议，这是后面蓝牙开发的基础知识。最后，在第三节从硬件和软件两个方面讲述了本课题的机器人蓝牙通信系统的实现。

## 第四章 机器人控制与检测系统及其实现

### 4.1 机器人控制与检测系统中问题的提出和解决

在生活中人们经常可以看到双足步行机器人象人一样灵巧地行走，那么，它的动作是怎么实现的呢？实际上，它是通过把各种各样的元器件进行巧妙的组合来实现各种动作的。一般情况下，控制机器人必须有各种各样的电路，例如驱动电机等动力源动作的电路，检测外界变化的传感器电路，以及针对上述电路进行信息处理、控制的 CPU（相当于人类的大脑）等。

本课题设计的机器人需要能够自动移动，转弯以及检测周围是否有障碍物，如果有障碍物，那么能够自动测量出障碍物与其之间的距离，并且能够自动的转弯避开这个障碍物。这个机器人的制作是为了给机器人的蓝牙通信提供一个平台，以及检验令牌式蓝牙网络模型。

在这个机器人的制作的过程中，我们将会不可避免的遇到两个方面的问题，一个是机器人的驱动控制问题，即机器人的运行采用什么样的驱动动力源，以及当机器人运行起来后如何控制它的运动速度等等；另外一个就是机器人检测系统的问题，机器人在运行或停止的过程中都需要具备有智能检测周围障碍物的能力，那么其检测障碍物采用什么样的手段、方式以及如何实现，这些都是值得仔细研究与思索的问题。针对上述两个方面的问题，本章将在下面的两节分别进行详述。

### 4.2 机器人驱动系统的控制

机器人整体的运行性能，首先取决于它的电池系统和电机驱动系统。电动小车的驱动系统一般由控制器、功率变换器及电动机三个主要部分组成。电动小车的驱动不但要求电机驱动系统具有高转矩重量比、宽调速范围、高可靠性，而且电机的转矩—转速特性受电源功率的影响，这就要求驱动具有尽可能宽的高效率区。电机是我们的生活中不可或缺的动力源，常用的有交流电机和直流电机，机器人中作为控制对象的电机大都是靠电池供给能源而转动的直流电机，因为直流电机的控制很简单，性能出众，直流电源也容易实现。通常，

直流电机一般主要分为永磁直流电机、伺服电机及步进电机三种。本设计采用的是实现最简单、成本最低的永磁直流电机，下面一节即主要介绍这种直流电机的驱动及速度控制。

#### 4.2.1、直流电机的转动控制

直流电机与直流电源或电池连接起来就可以实现转动。不过作为机器人的动力使用时，必须对电机转动进行开关（ON/OFF）控制。在机器人系统中通常需要一个控制芯片（PIC，单片机，ARM 或者 DSP 芯片），这些控制芯片的输出基本上都是微电流信号（10mA 左右），无法用来直接控制电机转动，因为电机转动的驱动电流一般需要几百 mA 以上，甚至达到几 A（安培）。因此，如果想用控制芯片来控制直流电机，则需要采用其他的方法，目前通用的主要有以下两种：

##### （1）继电器控制法

继电器是一种电子控制器件，通常应用于自动控制电路中，它实际上是用较小的电流去控制较大电流的一种“自动开关”。故在电路中起着自动调节、安全保护、转换电路等作用。继电器的种类较多，如电磁式继电器、舌簧式继电器、启动继电器、限时继电器、直流继电器、交流继电器等。但电子电路中，用得最广泛的就是电磁式继电器了。

通常，电磁式继电器一般由铁芯、线圈、衔铁、触点簧片等组成的。只要在线圈两端加上一定的电压，线圈中就会流过一定的电流，从而产生电磁效应，衔铁就会在电磁力吸引的作用下克服返回弹簧的拉力吸向铁芯，从而带动衔铁的动触点与静触点（常开触点）吸合。当线圈断电后，电磁的吸力也随之消失，衔铁就会在弹簧的反作用力返回原来的位置，使动触点与原来的静触点（常闭触点）吸合。这样吸合、释放，从而达到了在电路中的导通、切断的目的。对于继电器的“常开、常闭”触点，可以这样来区分：继电器线圈未通电时处于断开状态的静触点，称为“常开触点”；处于接通状态的静触点称为“常闭触点”。

##### （2）半导体电路控制法

图 4-2 所示的是以半导体电路为主实现直流电机的驱动。为了完成直流电机的控制，其采用的晶体管一般都是大功率型的。

图(a)是常用的电路, 三极管的集电极与直流电机连接, 改变基极的电压可以控制与集电极连接的电机的电流。由于驱动力大, 所以这种方式可用于电机的开关(ON/OFF)控制。

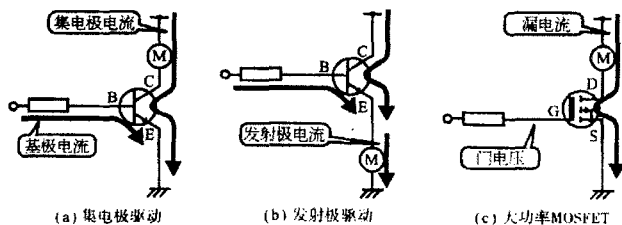


图 4-2 直流电机的半导体驱动电路

图(b)把三极管的发射极与直流电机连接, 改变基极电压可以控制与发射极连接的电机的电压。由于三极管起到可变电阻的作用, 所以它会造成电压降并损耗一定的电能。在低速工作的场合, 电压降较大导致电能的使用效率下降, 所以常用于速度控制。

图(c)的电路与图(a)相似, 但是改用了大功率 MOSFET。大功率 MOSFET 是电压驱动元件, 仅仅施加门电压即可运动, 因此电路简单, 可在高速下工作。此外, 该类元件工作的热特性稳定, 最近使用得越来越多。

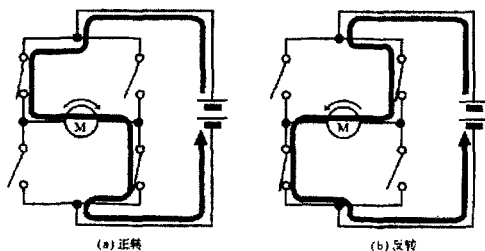


图 4-3 桥式电路的工作原理 (1)

式驱动电路。该电路可以实现电机的正转、反转。

不过, 上面介绍的电路只能使电机沿一个固定的方向转动, 不大符合机器人的实际要求, 因为机器人通常不仅需要前进, 也需要后退。这时, 可以改成如图 4-3 (1) 所示的桥

图 4-3 (1) 是借助对角线方向的一对开关的开闭组合来控制电机的转向, 而它还表示能利用开关的开闭实现电机的制动功能。其原理是由于电机线圈两

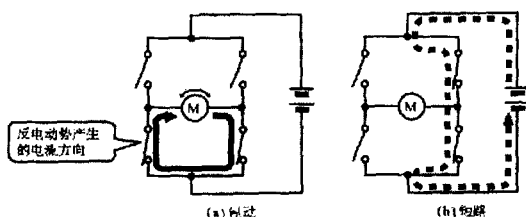
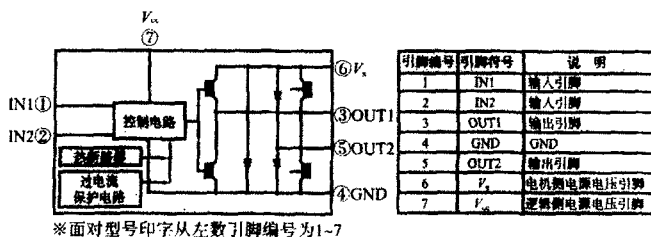


图 4-3 桥式电路的工作原理 (2)

端处于短路状态, 当外力企图使电机转动时, 其产生的反电动势将起到制动的作用。可是, 在桥式电路中, 当同侧开关处于图 4-3 (2) 所示的闭合状态时, 电源实际上被短路, 电路中将出现过大的电流。这时, 原来担负开关任务的三极管或 FET 将被损坏, 因此必须注意避免这种情况的发生。

直流电机控制的实际电路中都有防止短路的保护电路。目前, 已有一些专用的电机驱动 IC, 如果选用这样的驱动芯片, 电路设计就变得非常简单了。本设计中就采用了东芝株式会社制造的电机驱动芯片 (IC): TA7257P。下面就是它的内部电路的组成, 功能以及使用方法加以说明。



※面对型号印字从左数引脚编号为1~7

图 4-4 TA7257P 的结构框图

| IN1 | IN2 | OUT1 | OUT2 | 模式   |
|-----|-----|------|------|------|
| 1   | 1   | L    | L    | 制动   |
| 0   | 1   | L    | H    | 正/反转 |
| 1   | 0   | H    | L    | 反/正转 |
| 0   | 0   | 高阻抗  |      | 停止   |

表 4-1 TA7257P 功能表

TA7257P 的控制方法是如果向引脚 1、2 施加表图 4-4 中列出的信号, 它就会按照规定的模式动作。如置引脚 (IN1) 为 0, 引脚 2 (IN2) 为 1, 则电机正转 (取决于电机端子连接的+, - 状态, 也可以反转)。TA7257P 的工作电源电压范围  $V_{cc}$  是 6~18V,  $V_s$  为 0~18V。

## 4.2.2. 直流电机的速度控制

用开关 (ON/OFF) 控制直流电机, 只能控制其转动或停止。然而, 在机器人的实际应用的场合, 根据任务的要求, 通常需要控制直流电机的速度, 也就是要能够控制机器人的运行速度。目前, 比较典型的控制电机速度的方法主要有改变施加在电机上的电压以及 PWM (脉宽调制)。

第一种方法, 如果使用的是三极管, 那么控制电路 (发射极) 基本上与电机的开关控制差不多。与控制电压  $V_{cont}$  相比, 施加在电机上的端电压  $V_m$  仅仅低于  $V_{be}$  (三极管基极与发射极之间的电压降)。由于  $V_{be}$  基本上不变, 所以  $V_{cont}$  的变化也就是  $V_m$  的变化。然而, 电源电压在三极管的集电极和发射极之间产生电压降, 会造成集电极发热加剧, 因此需要对三极管采取散热措施。特别地, 在低电压, 低转动区段, 三极管中的电压降很大, 电源效率会显著降低。

第二种方法, 即 PWM 控制就是给直流电机输入高速的开关脉冲信号, 通过改变脉冲信号开关的比例, 达到速度控制的效果, 如图 4-5 所示:

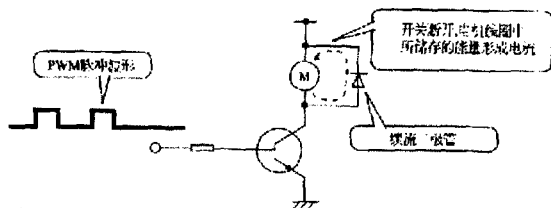


图 4-5 基于 PWM 的速度控制

在本系统中, 采用了后一种控制速度方法。PWM 控制就是给 DC 电机输入高速的开关脉冲信号, 通过改变脉冲信号开关的比例, 达到速度控制的效果, 如图 4-6 所示:

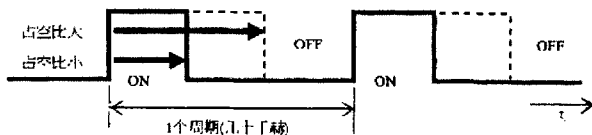


图 4-6 PWM 控制采用的波形

在 ON 的时间内施加电压，OFF 的时间内切断电压，因此电机的转动将是断续的。不过在脉冲波形的 OFF 区段，电机线圈内部存储的能量能够产生沿续流过二极管的流动电流（参看图 4-5），因此得以继续维持转动。施加给电机的电压呈图所示的脉冲波形，它的占空比，即信号中 ON 和 OFF 的比例也是可以改变的，通过改变脉冲波形的比例（占空比）可以实现速度的控制。

实际上，为了使电机能平稳地工作，脉冲的重复周期应该具有相当程度的快速性。PWM 脉冲频率决定了电枢电流的连续性，从而也决定了电机运行的平稳性。如果脉冲切换频率选择不当，电机的低速性能有可能不理想，容易烧毁晶体管，而且由于电流不连续，电机可能产生剧烈振荡，甚至出现啸叫现象，这些都是不允许的。因此，在设计时要慎重选择 PWM 切换频率。

#### 4.2.3 直流电机控制硬件及软件实现

本设计中采用 AT89C51（单片机）作为控制芯片，用以控制电机驱动芯片 TA7257P 来实现直流电机的转动及速度控制。一个 TA7257P 芯片只能控制一个直流电机，如果要求机器人具备自动转弯的功能，必须使用两片 TA7257P 芯片，一个用于后轮控制机器人的前进与后退，另一个用于前轮控制机器人的转弯。此外，直流电源采用的是 7.2V 的可充电的锂电池，而 AT89C51（单片机）的工作电源为直流 5V，因此需要采用一个电压转换芯片 7805，其能够将 7.2V 直接转换为 5V。机器人直流电机驱动控制系统的硬件电路如图 4-7 所示：

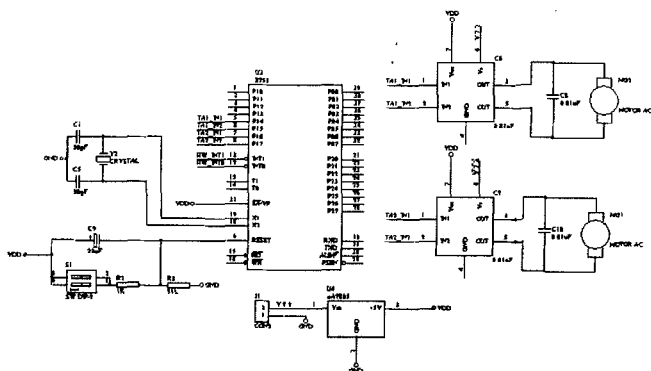


图 4-7 机器人电机驱动控制系统电路图

图 4-8 是机器人电机驱动控制系统程序流程图，它可以实现机器人的前进、后退、各种转弯等。机器人的运动速度可以通过 PWM 程序控制，但是在用 PWM 控制转速时，变化随受控电机的种类和规格有所不同，所以必须根据电机来调试选择合适的占空比和脉冲频率，以实现所需要的运行速度。

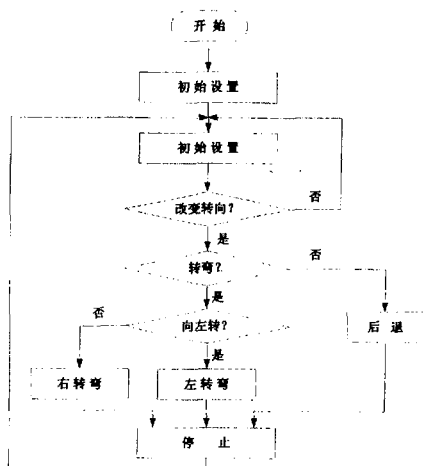


图 4-8 机器人电机驱动控制系统程序流程图

### 4.3 机器人检测系统及其实现

在自主移动机器人系统(AMRS)中,机器人在未知环境下必须依靠传感器系统不断地感知自身位置和环境信息,躲避障碍物。为了在复杂环境中获取有效的信息,机器人的传感器系统往往由种类不同的多个传感器组成。这些传感器检测到的数据经过融合后,才能准确地描述机器人周围的环境特征,为规划与控制提供可靠的依据。目前,红外线、超声波检测以其价格低廉,实现容易等优点,被广泛地用于移动机器人避障。

红外传感器是一种比较有效的接近觉传感器,经常被国内外学者应用在机器人避障系统中。传感器发出的光的波长大约在几百纳米范围内,是短波长的电磁波。红外传感器具有以下特点:不受电磁波的干扰、非噪声源、可实现非接触性测量。另外,红外线(指中、远红外线)不受周围可见光的影响,故可在昼夜进行测量。

超声波传感器是靠发射某种频率的声波信号,利用物体界面上超声反射、散射检测物体的存在与否的。超声波在空气中传播时如果遇到其它媒介,则会因两种媒质的声阻抗不同而产生反射。因此,若向空气中的被测物体发射超声波,然后检测反射波并对其进行分析,则可获得障碍物的信息。

在我们研制的移动机器人中同时采用了这两种检测障碍物的技术,下面两个小节将分别详细介绍红外线检测障碍物系统及其实现、超声波检测障碍物系统及其实现。

#### 4.3.1 红外线检测障碍物系统

红外线具有极强的反射能力,应用广泛,采用专用的红外线发射管和接收管,可以有效地防止周围可见光的干扰,进行无接触探测,不损伤被测物体。在本设计中,正是充分利用了红外线的反射的特点:由红外线发射装置发射红外线,在一定的时间内(这个时间由设计人员预先设置好),若红外线接收到了反射回的红外线,则将反射回的红外线转换为电信号,经电平转换后送入信息处理系统进行处理,从而控制机器人做出反应以绕过障碍物。

红外线发射与接收的方式有两种:一是直射式,二是反射式。直射式指发光管和接收管相对安放在发射与受控物的两端,中间相距一定距离;反射式指发光管和接收管并列一起,平时接收管始终无光照,只在发光管发出的红外光

遇到反射物时，接收管收到反射回来的红外线后才工作。双管红外发射电路，可提高发射功率，增加红外发射的作用距离。

我们在设计的移动机器人中采用了一种新的红外线检测模块 IRAS V1.0（如图 4-9 所示）。它把大部分功能集成化，使得做机器人更加方便。IRAS V1.0 是单红外避障电路，大部分元件使用的是贴片封装，使电路板体积大大减小，并有两个中 3 的螺丝孔，

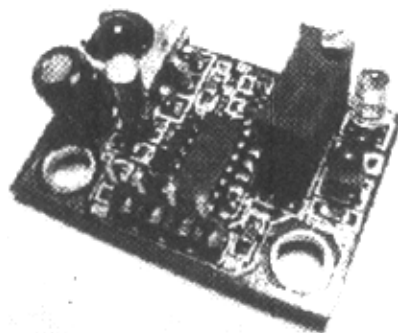


图 4-9 红外线检测模块 IRAS V1.0 外型图

以方便安装（如图 4-10 所示）。你可把 IRAS V1.0 安装在机器人的前后左右，形成 4 面避障系统。电路使用 4 线系统即 VCC、GND、ENABLE、OUTPUT，占用主 CPU 的 I/O 口少，以方便机器人添加其他的传感器。

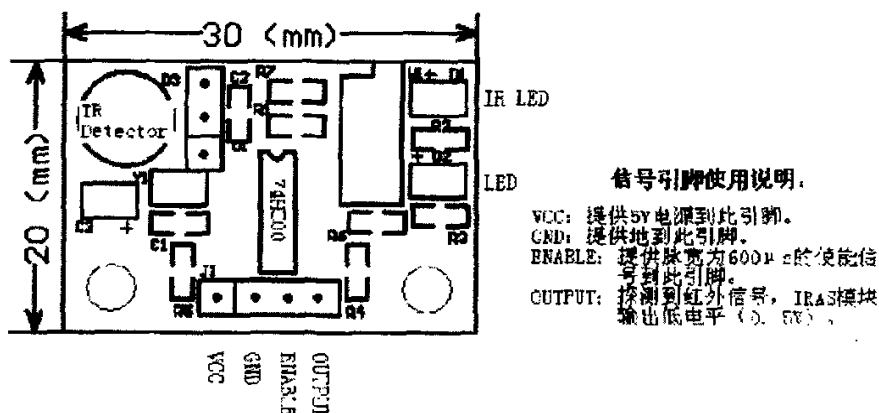


图 4-10 模块 IRAS V1.0 结构图

在 ENABLE 端输入一个脉宽为 600 ps 的使能信号后，信号发生器输出的 38KHz 信号便会推动 IR 发射管。当有障碍物时，信号反射回来被 IR 接收头接收，同时从 OUTPUT 输出低电平(0V)。

本设计中，单片机 AT89C51 采用中断方式控制红外线测障碍物模块 IRAS V1.0 检测周围是否有障碍物，其硬件连接图见附录，软件源程序如下：

```
#include<REG51.H>
#define uchar      unsigned char
```

```

#define uint      unsigned int
uchar Flag; //设置红外开关标志
sbit ENABLE=P1^0 ;//使能端定义，IO口任意修改
/*****
* 名称: Delay
* 功能: 延时 1000 us
*****/
void Delay(void)
{
    uchar i;
    for(i=125;i>0;i--){;}
}

/*****
* 名称: timer1
* 功能: 产生 600US 的使能信号
*****/
void timer1() interrupt 3
{
    TH1=-(300/256);
    TL1=-(300%256); //设定值 1 为 600us
    if(Flag==1)
        {ENABLE=!ENABLE;} //使能口输出 600US 的方波
    else ENABLE=0;
}

/*****
* 名称: INTOFun 中断
*****/
void INTOFun(void) interrupt 0
{
    //用户程序
}

/*****
* 名称: mian
* 功能: 主函数
*****/
void main(void)
{
    SCON = 0x00;
    TMOD = 0x11;
    TH1=-(300/256);
    TL1=-(300%256); //设定值 1 为 600us
    ENABLE=0;
}

```

```
ITO=1; //INT0 下降沿有效
EX0=1; //外部中断允许
ET1=1; //定时器 1 中断允许
TR1=1; //开始计数
EA=1;
Flag=1; //开红外, 1 为开, 0 外关
while(1)
{
    //用户程序
}
}
```

### 4.3.2 超声波测量系统

由于超声波指向性强, 能量消耗缓慢, 在介质中传播的距离较远, 因而它声波经常用于距离的测量, 如测距仪和物位测量仪等都可以通过它来实现。利用超声波检测往往比较迅速、方便、计算简单、易于做到实时控制, 并且在测量精度方面能达到工业使用的要求, 因此在移动机器人的研制上也得到了广泛的应用。

为了研究和利用超声波, 人们已经设计和制成了许多超声波发生器。总体上讲, 超声波发生器可以分为两大类: 一类是用电气方式产生超声波, 一类是用机械方式产生超声波。电气方式包括压电型、磁致伸缩型和电动型等; 机械方式有加尔统笛、液哨和气流旋笛等。它们所产生的超声波的频率、功率和声波特性各不相同, 因而用途也各不相同。目前较为常用的是压电式超声波发生器。

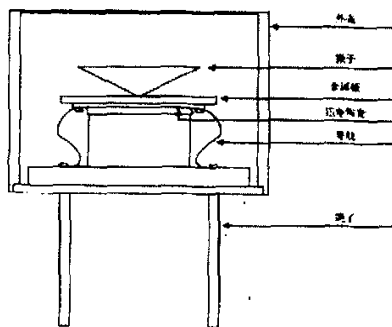


图 4-11 超声波发生器内部结构图

压电式超声波发生器实际上是利用压电晶体的谐振来工作的。超声波发生器内部结构如图 4-11 所示, 它有两个压电晶片和一个共振板。当它的两极外加脉冲信号, 其频率等于压电晶片的固有振荡频率时, 压电晶片将会发生共振, 并带动共振板振动, 便产生超声波。反之, 如果两电极间未外加电压, 当共振板接收到超声波

时, 若将压迫压电晶片作振动, 将机械能转换为电信号, 这时它就成为超声波接收器了。超声波传感器就是利用这种原理实现超声波的发射与接收的。超声

波传感器有透射式与反射式之分，它不但可以检测物体，还可以通过发射器的回波接收器所需要的时间来测量距离，其测距原理如下（参见图 4-12）：

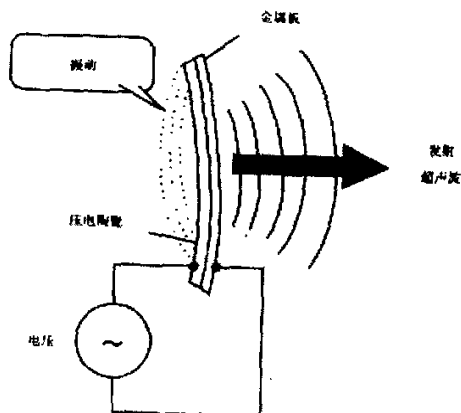


图 4-12 超声波传感器的工作原理图

超声波发射器向某一方向发射超声波，在发射时刻的同时开始计时，超声波在空气中传播，途中碰到障碍物就立即返回来，超声波接收器收到反射波就立即停止计时。超声波在空气中的传播速度为 340m/s，根据计时器记录的时间  $t$ ，就可以计算出发射点距障碍物的距离( $s$ )，即： $s=340t/2$ 。这就是所谓的时间差测距法。

超声波传感器是利用超声波的特性研制而成的传感器。超声波是一种振动频率高于声波的机械波，由换能晶片在电压的激励下发生振动而产生的，它具有频率高、波长短、绕射现象小，特别是方向性好、能够成为射线而定向传播等特点。超声波对液体、固体的穿透本领很大，尤其是在阳光不透明的固体中，它可穿透几十米的深度。超声波碰到杂质或分界面会产生显著反射形成反射回波，碰到活动物体能产生多普勒效应。因此超声波检测被广泛应用在工业、国防、生物医学等方面。以超声波作为检测手段，必须产生超声波和接收超声波。完成这种功能的装置就是超声波传感器，习惯上称为超声换能器，或者超声探头。

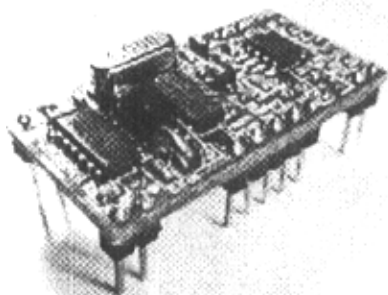


图 4-13 URM37 超声波测距模块



图 4-14 超声波探头

在我们的移动机器人中也采用一个超声波模块——URM37 超声波测距模块（参见图 4-13）。这个模块非常适合移动机器人，具有很高的功能集成度：不需要你重新开发测距的程序，不需要重新布置线路，也不必担心内部的定时器这些资源是否够用...此外，为了减小体积和重量，URM37 超声波测距模块全部使用小型的贴片元件。URM37 超声波测距模块具有温度校正和软件补偿，它使用 PIC16F676 做主控制器，具有高速度、低功耗、内带 128 字节 EEPROM，可通过两线通讯口读写 8 路 10 位 A/D，通过两线通讯口读取 A/D 转换数据、外部使用 HC 或 SPI 方式通讯等特点。

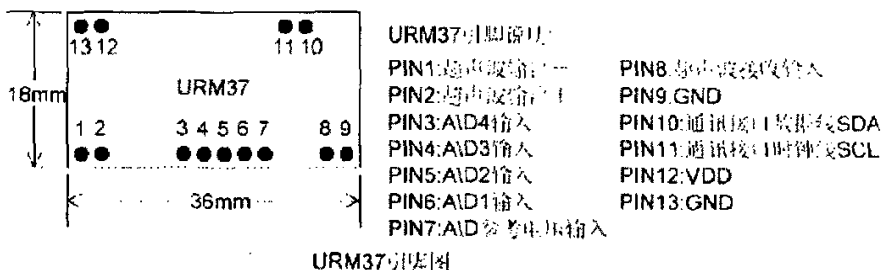


图 4-15 URM37 超声波测距模块引脚图

URM37 超声波测距模块使用两条数据线:时钟 SCL 和数据 SDA 与主控制器之间进行通讯，它们之间的通信协议类似于 IIC 总线模式。图 4-16 是 URM37 超声波测距模块通信协议：

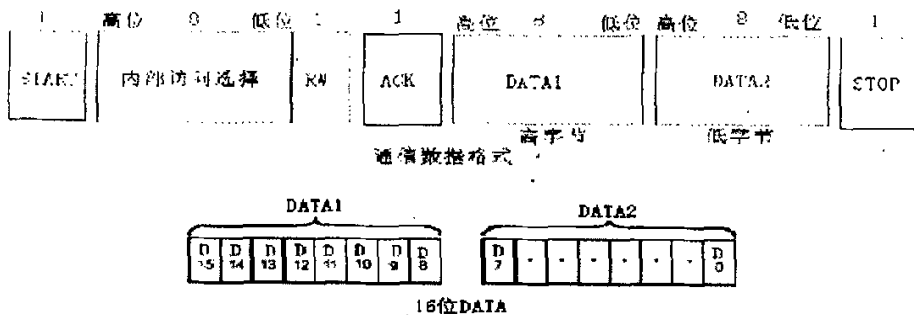


图 4-16 URM37 超声波测距模块通信协议

通讯的 START、RW、ACK、STOP 等信号的产生以及数据排列遵从标准 IIC 协议，只是硬件地址采用 9 位的方式，取消了 1 字节的 ADDRESS BYTE，这是为了简化通讯的折中。发送 9 位内部访问地址码，访问 128 字节的 EEPROM、温度、距离及 4 个 A/D 采样，最后一位是 RW 位。模块在收到命令后开始执行相应的操

作，操作完成后产生一个低电平的 ACK 信号，操作模块的处理器在发出命令后便开始等待 66MS 最大耗时，如果该期间没有返回 ACK 信号就认为操作失败。如果收到 ACK 信号，这时在 SCL 线上会产生 16 个脉冲，可从 SDA 读出这 16 位数据。温度、测量距离、A/D 数据及读写 EEPROM 都是以一个 16 位的 unsigned int 数据类型表示，读写 EEPROM 只占用了低 8 位，A/D 数据占用了低 10 位。

本设计中，单片机 AT89C51 采用模拟 IIC 总线控制 URM37 超声波测距模块测量周围障碍物的距离，其硬件连接图见附录，软件源程序如下：

```

*****
* 名称: Delay_us
* 功能: 延时
*****/
void Delay_us(uint DelayTime)
{
    uchar *p;
    p = &DelayTime;
    DelayTime = 65535-DelayTime;
    TR0 = 0;
    TF0 = 0;
    TH0 = *p++;
    TL0 = *p;
    TR0 = 1;
    while(TF0 == 0);
}

/*****
* 名称: HEX_TO_DEC
* 功能: 将一个 16BIT 的 16 进制数转换为 10 进制数
*****/
void HEX_TO_DEC(uint source,uchar * object)
{
    uchar i;
    for(i=0;i<5;i++)
    {
        *(object+i) = source % 10;
        source/=10;
    }
    return;
}

/*****
* 名称: IIC_START
* 功能: IIC 启动信号
*****/
void IIC_START(void)//启动信号
{
    uchar i;
    IIC_SCL = 0;
    for(i=0;i<7;i++);
    IIC_SDA = 1;
}
    
```

```

        IIC_SDA = 1;
        for(i=0;i<7;i++);
        IIC_SCL = 1;
        for(i=0;i<7;i++);
        IIC_SDA = 0;
        for(i=0;i<7;i++);
        IIC_SCL = 0;
    }

    /*******
    * 名称: IIC_ACK
    * 功能: 读取返回应答信号
    * 返回值: 操作标志
    *****/
    uchar IIC_ACK(void) //读取返回应答信号
    {
        uchar i;
        TR0 = 0;
        TF0 = 0;
        TL0 = 0;
        TH0 = 0;
        TR0 = 1;
        while(IIC_SDA)
        { if(TF0 == 1) return ERROR; }
        TR0 = 0;
        TF0 = 0;
        TL0 = 0;
        TH0 = 0;
        TR0 = 1;
        while(IIC_SDA==0)
        { if(TF0 == 1) return ERROR; }
        for(i=0;i<7;i++);
        return OK;
    }

    /*******
    * 名称: SendByte
    * 功能: 发送 1 Byte 数据
    * 输入: uchar Byte
    *****/
    void SendByte(uchar Byte) //发送 1 Byte 数据
    {
        uchar i;
        uchar j;
        for(j=0;j<8;j++)
        {
            IIC_SCL = 0;
            for(i=0;i<7;i++);
            IIC_SDA = (bit)(Byte & 0x80);
            Byte <<= 1;
            for(i=0;i<7;i++);
            IIC_SCL = 1;
            for(i=0;i<7;i++);
        }
        IIC_SCL = 0;
    }

```

```

}

/*****
* 名称: Send_BIT9RW
* 功能: 发送第 9 位的 R/W_N
* 输入: uchar RW
*****/
void Send_BIT9RW(uchar RW) //发送第 9 位的 R/W_N
{
    uchar i;
    IIC_SCL = 0;
    for(i=0;i<7;i++);
    if(RW == W)
        IIC_SDA = W;
    else
        IIC_SDA = R;
    for(i=0;i<7;i++);
    IIC_SCL = 1;
    for(i=0;i<7;i++);
    IIC_SCL = 0;
    IIC_SDA = 1;
    for(i=0;i<7;i++);
}

/*****
* 名称: ReceiveTwoByte
* 功能: 接收 2 Byte 数据
* 输入: uint *p
*****/
void ReceiveTwoByte(uint *p) //接收 2 Byte 数据
{
    uchar i;
    uchar j;
    uint TempInt;
    *p = 0;
    TempInt = 0x8000;
    for(j=0;j<16;j++)
    {
        IIC_SCL = 1;
        for(i=0;i<7;i++);
        if(IIC_SDA == 1)
            *p = *p + TempInt;
        CY = 0;
        TempInt = TempInt>>1;
        for(i=0;i<7;i++);
        IIC_SCL = 0;
        for(i=0;i<7;i++);
    }
}

/*****
* 名称: Read_Ultra
* 功能: 读超声波测量到的距离数据
* 调用: IIC_START, SendByte, Send_BIT9RW, IIC_ACK, ReceiveTwoByte
* 输入: uint *p
*****/

```

\* 返回值: 操作标志

\*\*\*\*\*/

```
uchar Read_Ultra(uint *p)//读超声波测量到的距离数据
{
    uchar Temp;
    IIC_START(); //启动信号
    SendByte(150);
    Send_BIT9RW(R); //读
    Temp = IIC_ACK();
    if(Temp == OK)
    {
        ReceiveTowByte(p);
        return OK;
    }
    else
        return ERROR;
}
```

#### 4.4 移动机器人避障实验

本文在前面各章节分别讲述了移动机器人驱动控制系统和障碍物检测系统的设计, 现在, 本节将准备按以上讲述的方法制作的移动机器人进行自动检障、避障实验。自主移动机器人采用了 7.2V 的可充电的锂电池作为供电电源, 装备有红外线和超声波传感器, 能够智能地识别前方的障碍物是突发移动的障碍物还是固定的障碍物, 如果是固定的障碍物, 自主移动机器人能够通过自动转弯从而避开这个障碍物, 继续前进。下面一组图片 (图 4-17) 就是自主移动机器人自动检障、避障实验过程。

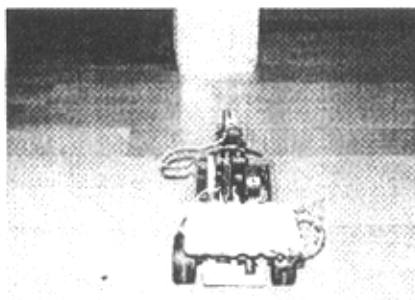


图 4-17 自动避障实验过程 (1)

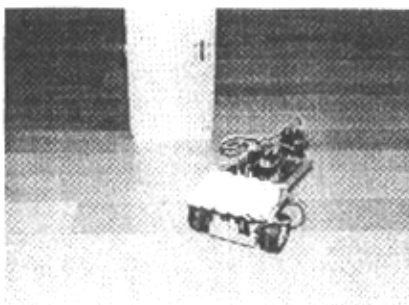


图 4-18 自动避障实验过程 (2)

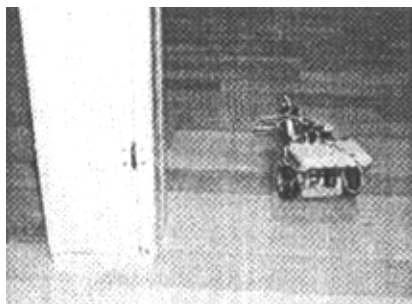


图 4-19 自动避障实验过程 (3)



图 4-20 自动避障实验过程 (4)

自主移动机器人在前进的过程中随时检测周围的环境，并确定前方是否有障碍物，如图 4-17（1）显示，自主移动机器人检测到前方有一个障碍物（这是我们在实验中故意设置的一个障碍物：一个银白色的铁盒子），它便停止下来，分析前方出现的障碍物是突发移动的障碍物还是固定的障碍物。大约一秒钟后，它分析出前方是固定的障碍物，于是，它便进行自动转弯（如图 4-18、4-19、4-20）。这样，自主移动机器人就成功地完成了一次自动检障、避障实验。

## 4.5 本章小结

本章是机器人控制与检测系统的实现阶段，首先提出在移动机器人的制作的过程中遇到的两个方面的问题：机器人的驱动控制问题；机器人检测系统的问题。然后，利用两个小节分别对这两个问题进行了详细的叙述，从其基本原理到实现方式都进行了论述，并给出了具体的电路原理图和程序。最后，简要介绍了自制的自主移动机器人自动检障、避障实验。

## 第5章 总结与展望

### 5.1 全文总结

蓝牙技术是一种无线数据与语音通信开放性全球规范,是由 Ericsson、IBM、Intel、Nokia 和 Toshiba 等公司于 1998 年联合推出的一项最新的短距离无线通信技术<sup>[4]</sup>。其设计的初衷就是以性能最好、价格最低的一种短距离无线通信方式取代现有的短距离无线通信方式。机器人一直是各国竞相研究、集成最新科技成果的高技术象征。从一定意义上讲,机器人水平的高低集中体现了这个国家的综合科技实力。如何将蓝牙应用于机器人已成为该领域的研究热点之一,蓝牙技术为开放式机器人与信息空间之间的可靠衔接提供了技术保障。本文就是着眼于如何将蓝牙技术融合到多机器人通信中,具体所做的工作如下:

1) 本文探讨了目前多机器人之间通信的主要方式:现场总线方式、红外线方式等,通过简要比较分析这些通信方式和蓝牙无线通信技术的通信机制,得出一个结论:蓝牙技术相对于这些通信方式具有许多的优越性,同时又非常的适合于多机器人通信系统。

2) 针对多机器人的组织结构,从控制的角度分析,多机器人系统主要有二种控制方式:集中控制方式和分布控制式。在本论文讨论的多机器人系统中,各个机器人具有很好的独立自主性和一定的智能性,彼此之间通过蓝牙技术进行通信,组成一个分布式的多机器人系统。然而,蓝牙技术在设计之初并不是针对分布式系统的,因而将蓝牙技术应用在分布式多机器人系统将不可避免地存在一些问题,本文分析了三个将会出现的主要问题。

3) 本文提出了一个新的观点,认为蓝牙网络可以有两种模式:动态的蓝牙网络模式与静态的蓝牙网络模式,它们之间最大区别是动态的蓝牙网络模式中网络中设备之间的主从关系是经常变换的。分析认为动态蓝牙网络模式能很好的克服上述三个主要问题,更加适合分布式多机器人系统。基于这一思想,提出了一种动态蓝牙网络模式——令牌式蓝牙网络模式,并详细地叙述了这种新的蓝牙网络模式的基本原理及其实现。

4) 蓝牙通信系统开发主要有两种开发方案:一种是直接从蓝牙子系统做起,涉及到射频、基带等硬件协议层。另一种是基于 HCI 协议层的应用开发。

本文从硬件和软件两个方面详细讲述了本课题采用的基于 HCI 层的机器人蓝牙通信系统的实现。

5) 文章结尾探讨了在移动机器人制作的过程中遇到的两个方面的问题：机器人的驱动控制问题；机器人检测系统的问题。此外，制作完成了一个可以自动检障、避障的可移动机器人，并进行了自动检障、避障实验。

## 5.2 研究展望

本文在蓝牙技术应用在分布式多机器人系统进行了比较深入的探讨，提出了一种更加适合于分布式多机器人系统的动态蓝牙网络模式——令牌式蓝牙网络模式。这种网络模式的提出，可以为分布式多机器人系统中各个机器人主体之间相互通信、和谐的协作提供一种新的有效的解决思路。但由于本人知识水平及学习时间有限，文章还存在许多不足之处。在本文的基础上，今后还可以对以下方面进行深入的研究：

1) 在令牌式蓝牙网络模式实现的过程中，可能还会隐含一些问题，例如：微微网中 Master 确在工作，且总处于工作状态时，Slave 的有限等待法怎样确认这种情况。这些隐含问题的有效解决需要进一步的分析和研究。

2) 本文讨论的令牌式蓝牙网络模式主要是针对由八个独立、对等的机器人组成的分布式系统。这种令牌式蓝牙网络本质上是一个蓝牙微微网，然而一个蓝牙微微网最多只能由八个活动的(active)设备组成，如果分布式多机器人系统由多于八个的机器人组成，则该如何解决这个矛盾。

3) 蓝牙技术不但可以无线传输数据，而且还可以传输语音。本文设计的机器人蓝牙通信系统还没有涉及语音传输，因而如何实现蓝牙语音通信也是一个值得进一步研究的方面。

由于时间及水平有限，本文在这方面做的还很不够，希望后来者能够在这方面做得更成熟。至此在全文结束之际，恳请各位专家、师长以及对本研究感兴趣的读者对本文中错误、不足之处不吝赐教，并提出批评指正，作者将不胜感激！

## 参考文献

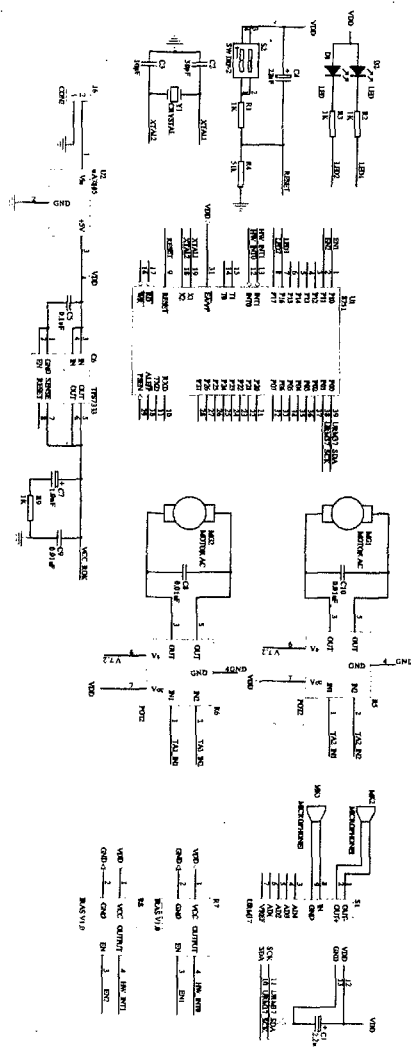
- [1] 李实等. 清华机器人足球队的结构设计与实现「J」. 清华大学学报(自然科学版),2001,17(5):420-426.
- [2] 申康等. 红外与蓝牙技术的比较. 微电子技术, 2001 (10) ,5 (29) .
- [3] 林怡青等. 机器人群体合作的信念分析. 机器人, 2000, 22(5): 351 – 353.
- [4] 扬悦、刘超等编. 蓝牙技术及其原理. 电信快报: 2002.2., 17~20 页.
- [5] 扬春燕、刘军兰等编. 蓝牙基带控制器芯片 MT1020A 及其应用. 国外电子元器件: 2001.8.
- [6] 系胜生、范哗斌等编. 新型蓝牙局域网访问模式. 计算机工程: 2002.7.
- [7] 苏雪莲编. 蓝牙产品及蓝牙芯片技术的发展. 微电子技术: 2002.8, 1~10 页.
- [8] 殷跃红、盛金军等编. 机器人与“蓝牙”技术集成研究策略. 高技术通讯: 2002.10, 96~101 页.
- [9] 李焱、杨士元. 基于微处理器的蓝牙应用系统的软件实现. 计算机工程: 2003.10, 133-135 页.
- [10] 吴永忠、韩江洪等编. 蓝牙技术综述. 《微型机与应用》2001 年第 6 期.
- [11] 时和平、马秀芳. 蓝牙技术讲座 3——蓝牙的网络结构和信道控制. 《中国数据通信》, 2002.1. 84~89.
- [12] 黄卜夫, 熊蓉等编. 基于视觉足球机器人无线通讯子系统的设计. 工程设计学报,2002.[9]. 265~267, 274.
- [13] 马兴, 梁剑, 陈前斌. 基于 HCI 协议层的蓝牙技术应用开发. 重庆邮电学院学报. 2002 年 12 月,第 14 卷,第 4 期.
- [14] 宋光明, 葛运建等. 基于蓝牙技术的智能机器人传感器网络研究. 传感技术学报, 2003(3):1-5
- [15] 殷跃红,盛金军等. 机器人与“蓝牙”技术集成研究策略. 高技术通讯, 2002(10):96-101
- [16] 唐平,扬宜民. 多智能体系统与足球机器人系统体系结构研究. 广州工业大学学报,2001,18(4):1-3.
- [17] 康小强. 基于 BDI 的多 Agent 交互. 计算机学报, 1999(11):1165-1171
- [18] 宋光明、葛运建编. 基于蓝牙技术的智能机器人传感器网络研究. 传感技术学报,2003.3. 1~5.
- [19] 张粤、倪伟. 蓝牙技术在机械手控制系统中的应用. 《电气自动化》2003 年第 25 卷第 4 期, 49~51、56 页.
- [20] 傅剑虹、汪敏. 蓝牙跳频系统的一种自适应改进方案及其性能分析. 通信技术,2003.[9], 59~61 页.
- [21] 房胜, 钟玉琢. 蓝牙技术在家庭网络中的应用—家电控制. 小型微型计算机系统. 2003.10, 1870~1872 页.
- [22] 张健. 蓝牙协议栈的研究及其 C 语言实现. 大连海事大学 (硕士论). 2003.3

- [23] 严德政. 蓝牙网络中的通信安全与实现. 浙江大学(硕士论文). 2001.12
- [24] 查光明, 熊贤祚扩频通信. 西安: 西安电子科技大学出版社. 1992
- [25] 范佳曦, 宋铁成, 沈连丰. 跳频方案研究. 全国无线和移动通信学术会议论文集. 1999
- [26] 朱近康. 扩展频谱通信及应用. 中国科技大学出版社. 1995
- [27] 周正伟. 蓝牙基带IP实现技术研究. 电子科技大学(博士论文), 2002.4
- [28] 宋明中、侯思祖、马昕霞. 基于蓝牙技术的PC机间数据通信接口设计与实现. 电力系统通信, 2003年第8期.
- [29] 张禄林, 雷春娟, 郎晓虹编著. 蓝牙协议及其实现. 北京: 人民邮电出版 2001.10
- [30] Miller B A. "Bluetooth applications in pervasive computing". IBM White Paper, Feb.2000
- [31] Bluetooth Specifications, Bluetooth SIG at <http://www.bluetooth.com>
- [32] BluetoothTM, Specification Volume 1 Specification of the Bluetooth System Core, Version 1. 1, 2001.
- [33] BluetoothTM, Specification Volume 2 Specification of the Bluetooth System Core, Version 1. 1, 2001.
- [34] Bluetooth SIG . Bluetooth PC Card Transport Layer, Version 1.0. Aug.25.1999
- [35] Bluetooth SIG . Specification of the Bluetooth System (core), Version 1.1. Feb.22.2001
- [36] Bluetooth SIG . Specification of the Bluetooth System (Profiles), Version 1.1. Feb.22.2001
- [37] Huang Pufu.. Cart Subsystem to Robot Soccer Based on Phase-lock-loop Technique [J]. WCICA, 2002(3): 522-526.
- [38] Shoham. Y.. Agent oriented programming. Artificial Intelligence, 1993, 60(1): 51-92
- [39] Jennings. N.. Cooperation in industrial multi-agent system. World Scientific Series in Computer Science, Singapore, 1994:1-77
- [40] Song Guangming; Ge Yunjian; Zhang Jianjun; Tang Yi. "Research on smart robot sensor network based on Bluetooth". Chinese Journal of Sensors and Actuators, vol.16, no.1, p.1-5, 2003.
- [41] Lu Jia-Wei. "Bluetooth host controller interface". Semiconductor Technology, Vol.28, No.3, Pages:54-7, 2003.
- [42] Yeong Che Fai; Amin, S.H.M.; Bt Faisal, N.; Bakar, J.A. "Bluetooth enabled mobile robot". IEEE ICIT'02. 2002 IEEE International Conference on Industrial Technology. Productivity Reincarnation through Robotics and Automation (Cat. No.02TH8654). Part vol.2, p.903-8 .

- [43] Rana Basheer, M.; Rao, V.; Derriso, M. "Self organizing wireless sensor networks for structural health monitoring". Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering, Vol.5049, Pages:515-25, 2003.
- [44] Ting-Yu Lin; Yu-Chee Tseng. "Collision analysis for multi-bluetooth picocells environment". IEEE Communications Letters, Vol.7, No.10, Pages: 475 - 7. Oct. 2003.
- [45] Richard Barber. "Security in a Mobile World — is Bluetooth the Answer?". Computers & Security, Volume 20, Issue 5, 1 July 2001, Pages 374-379
- [46] Xu, Xing; Ping, Heng. "The Bluetooth Technology Application in Wireless Measurement". Proceedings of the International Symposium on Test and Measurement, Vol 6, 2003, Pages: 4439 - 4441.
- [47] Haartsen, Jaap. "Bluetooth – the universal radio interface for ad hoc , wireless connectivity". Ericsson Review (English Edition), Vol 75, No 3, 1998, Pages: 110-117.
- [48] Du, Hong Feng; Tian, Tiehong; Zhou, Zheng. "An overview of bluetooth personal area network". Conference Title: Proceeding of the International Conference on Telecommunications 2002, Date: 2002.6.23 - 2002.6.26.
- [49] Heider, G.; Fink, B. "Development environment for creating the first Bluetooth products". Electronic Product Design, Vol.20, No.5, Pages:24-5,27; May 1999.
- [50] Ting-Yu Lin , Yu-Chee Tseng, Keng-Ming Chang. "A new BlueRing scatternet topology for Bluetooth with its formation, routing, and maintenance protocols". Wireless Communications and Mobile Computing. Volume 3.Issue 4. Pages: 517-537. 25 Jun 2003.
- [51] Siegemund F, Florkemeier C. "Interaction in pervasive computing settings using Bluetooth-enabled active tags and passive RFID technology together with mobile Phones". Proceedings PerCom 2003 (IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications), March 2003.
- [52] Arfwedson, H.; Sneddon, R. "Ericsson's Bluetooth modules". Ericsson Review vol.76, No.4, 1999, Pages: 198-205;
- [53] Haartsen, J.; Naghshineh, M.; Inouye, J.; Joeressen, O.; Allen, W. "Bluetooth: vision, goals, and architecture". Mobile Computing and Communications Review, Vol.2, No.4, Pages:38-45. Oct. 1998.
- [54] Pietro Manzoni and Juan Carlos Cano. "Providing interoperability between IEEE 802.11 and Bluetooth protocols for Home Area Networks". Computer Networks, Volume 42, Issue 1, 15 May 2003, Pages 23-37
- [55] Zussman, G., Segall, A. "Capacity Assignment in Bluetooth Scatternets – Analysis and Algorithms". CCIT Report 355, Technion - Department of Electrical Engineering, (Oct. 2001)

- [56] Naveen Erasala and David C. Yen. "Bluetooth technology: a strategic analysis of its role in global 3G wireless communication era". Computer Standards & Interfaces, Volume 24, Issue 3, July 2002, Pages 193-206
- [57] N. Sriskanthan, F. Tan and A. Karande. "Bluetooth based home automation system". Microprocessors and Microsystems, Volume 26, Issue 6, 10 August 2002, Pages 281-289.
- [58] Jingxin Xue and Terence D. Todd. "Basestation collaboration in Bluetooth voice networks". Computer Networks, Volume 41, Issue 3, 21 February 2003, Pages 289-301
- [59] Roy Szweda. "POF vs Bluetooth". III-Vs Review, Volume 13, Issue 3, May-June 2000, Page 55.
- [60] Bruce Potter. "Wireless Device Discovery". Network Security, Volume 2003, Issue 8, August 2003, Pages 4-5
- [61] Golmie, N.; Van Dyck, R.E.; Soltanian, A.; Tonnerre, A. "Interference evaluation of bluetooth and IEEE 802-11b systems". Wireless Networks, Vol.9, No.3, Pages:201-11, 2003.
- [62] Garner, P.D. "Mobile Bluetooth networking : technical considerations and applications". Fourth International Conference on 3G Mobile Communication Technologies (3G 2003) (IEE Conf. Publ.No.494), Pages: 274-6

# 附录 移动机器人控制与检测系统硬件电路图



## 攻读硕士学位期间发表的学术论文

1. TAN Yuegang, WANG Quan. A dynamic Bluetooth Network Model For the distributed MultiAgent. The First Asia International Symposium on Mechatronics (AISM 2004), September 27~30, 2004, Xi'an, China.

## 致 谢

此文是在老师谭跃刚教授的精心指导和亲切关怀下完成的。衷心感谢我的导师谭跃刚教授！谭老师以其渊博的专业知识、严谨的治学态度和开阔的思维方式时刻感染着我。在本文的写作过程中，谭老师给予了我及时与耐心的指导，在本文技术难点的研究工作中给予了热情的指导，并最终完成我的学位论文。在两年多的研究生学习期间，谭老师在生活上给予我悉心的照顾，教给我许多做人的道理，谭老师正直的人品深深影响了我，将使我终身受益。

再次感谢谭老师！

感谢同实验室的师兄师弟：倪非、吴鹏、申魁华、李国平、吴柯、姜紫庆、藤波、钟先友等给予我各方面的帮助和体谅，是他们和作者一起共渡难忘的求学时光！

感谢武汉理工大学硕 2002 级机电的全体同学！我们一同走过了难以忘怀的岁月，缔结了永恒而真挚的友谊，希望你们拥有美好的未来！

特别地，我要感谢我的父母双亲、姐姐对我二十多年的关心和培育！他们始终是我心中力量的源泉，没有他们的支持和鼓励就没有我的今天！在他们身上我感受到了亲人的重托和亲情的伟大！感谢他们对我的理解、关爱和支持！

2005/4/12