

分类号: TP24/TP29

UDC: 621 学号: 030144



# 东南大学 硕士学位论文

## 移动机器人完全遍历系统研究

研究生姓名: 刘奎

导师姓名: 张赤斌 副教授

申请学位级别 硕 士 学科专业名称 机械电子工程

论文提交日期 2006 年 3 月 6 日 论文答辩日期 2006 年 4 月 7 日

学位授予单位 东 南 大 学 学位授予日期 2006 年 月 日

答辩委员会主席 黄锦连 评 阅 人

2006 年 3 月 6 日

# **Research on Mobile Robots Complete Coverage System**

A Dissertation Submitted to

Southeast University

For the Academic Degree of Master of Science

BY

Liu kui

Supervised by

Associate Prof. ZHANG Chi-bin

Department of Mechanical Engineering

Southeast University

March 2006

## 东南大学学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得东南大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名： 刘奎 日 期： 2006.4

## 东南大学学位论文使用授权声明

东南大学、中国科学技术信息研究所、国家图书馆有权保留本人所送交学位论文的复印件和电子文档，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。除在保密期内的保密论文外，允许论文被查阅和借阅，可以公布（包括刊登）论文的全部或部分内容。论文的公布（包括刊登）授权东南大学研究生院办理。

研究生签名： 刘奎 导师签名： 张赤斌 日 期： 2006.4

## 摘 要

### 移动机器人完全遍历系统研究

研究生：刘奎 指导老师：张赤斌 副教授

（东南大学机械工程系，南京）

随着智能控制、计算机网络、仿生学以及人工智能等理论发展，移动机器人技术的研究及应用越来越受到国内外学者的重视。移动机器人的遍历路径规划有着广泛的应用前景，如清洁机器人、自主吸尘器、草坪修剪机、自主收割机、自主地面矿藏探测器等都是它的典型应用，因此移动机器人遍历路径规划受到广泛关注。

和通常所说的点到点的路径规划不同，完全遍历路径规划是一种在二维空间中特殊的路径规划，它要求机器人覆盖工作空间中的所有无障碍区域。本文以室内清洁遍历移动机器人为研究对象，系统地移动机器人环境建模和遍历算法进行了分类研究。在此基础上，提出了一种新的完全遍历路径规划算法，并开发了完全遍历系统的硬件平台。本文主要完成以下内容：

1. 以单元分解覆盖方法的思想为中心，提出了一种新的基于栅格法和拓扑法的环境建模方法——矩形环境建模，该模型由单元基点和交错网络组成。该模型将环境划分成若干个子区域，每个子区域通过基点和交错网络连接。子区域和基点一一对应，通过搜索基点便可以找到对应的子区域。

2. 在矩形环境建模的基础上，提出了基于搜索规则的完全遍历路径规划算法。算法将整个完全遍历路径规划划分成两层：全局路径规划和局部路径规划。全局采用搜索规则完成基点搜索，找到未遍历的子空间；局部采用模板法进行局部区域遍历。最后通过软件仿真表明：此算法信息存储量小，简单高效，对较复杂的环境仍然具有很好的遍历效果。

3. 研制了移动机器人完全遍历系统的硬件平台，该硬件平台包括环境感知系统，电机驱动系统和主控板系统。

**关键字：**移动机器人，完全遍历，路径规划，环境建模，矩形分解法

## Abstract

### Research on Mobile Robots Complete Coverage System

Candidate for Master: **Liu kui**

Adviser: **Associate Prof. ZHANG Chi-bin**

(**Southeast University, Nanjing**)

With the fast development of new principle in intelligent control, computer network, bionics and artificial intelligence, mobile robot has become the focus in the field of robotics and automation. Complete coverage path planning of mobile robot has wide application prospect. Many robot appliances require the complete coverage path planning, such as cleaning robots, vacuum robots, lawnmowers, automated harvesters, land mine detectors and so on. At present, complete coverage path planning has received much attention in robotics and artificial intelligence fields day by day.

Be different with usually point-to-point path planning, Complete coverage path planning is a special type of trajectory generation in 2- dimensional (2D) environments; it requires the robot path to pass through the whole area of the workspace. This thesis studied the complete coverage path planning of indoor service mobile robots. We have studied the environment modeling and coverage algorithms of mobile robots systematically. The algorithm descriptions are represented. Then we have proposed a new complete coverage path planning algorithm and designed its hardware platform. In this paper, we lucubrate on some key techniques of mobile robot system as following:

1. Based on the cellular decomposition algorithm, we have proposed a new environment modeling algorithm - rectangle decomposition which is composed of cellular nodes and interleaving network. The environment is divided into some small region (subspace), in which there is a special point (mark node). If the node is found, the corresponding subspace is found too.
2. Based on rectangle decomposition, we have proposed a new coverage algorithm, which includes global path planning and local path planning. In the global path planning, uncovered subspaces are found one by one using a special search rule. In the local path planning, the subspace is covered using template based model. Finally we have presented software simulation, which shows that the coverage algorithm is simple, efficient, and even adapt for complex environment.
3. In addition, a novel hardware platform of mobile robot complete coverage system has been developed. It includes embedded environment perception system (EEPS), motor drive system and master control system.

**Key Words:** Mobile Robots, Complete Coverage, Path Planning, Environmental Modeling, Rectangle Decomposition

## 目 录

中文摘要 .....	I
英文摘要 .....	II
第一章 绪论 .....	1
1.1 课题研究背景与意义 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	1
1.3 课题研究内容 .....	3
1.4 本文章节划分 .....	4
1.5 本章小结 .....	4
第二章 基于栅格拓扑法的移动机器人环境建模研究 .....	5
2.1 环境地图描述 .....	5
2.2 几种典型环境地图描述 .....	5
2.2.1 栅格法环境地图建模 .....	5
2.2.2 几何法环境地图建模 .....	6
2.2.3 拓扑法环境地图建模 .....	6
2.2.4 可视图法环境地图建模 .....	7
2.2.5 自由空间法环境地图建模 .....	7
2.3 环境定位 .....	8
2.3.1 距离测量 .....	8
2.3.2 相对坐标法 .....	10
2.3.3 移动机器人定位 .....	11
2.4 矩形环境地图建模 .....	11
2.4.1 矩形环境地图建模思想 .....	11
2.4.2 正方形环境建模 .....	12
2.4.3 矩形环境建模 .....	13
2.4.4 矩形环境电子地图建立 .....	14
2.4.5 矩形环境地图建模优缺点 .....	15
2.4.6 矩形环境建模若干问题研究 .....	15
2.5 本章小结 .....	16
第三章 基于矩形分解法的移动机器人完全遍历算法研究 .....	17
3.1 路径规划核心问题 .....	17
3.1.1 环境表示 .....	17
3.1.2 路径搜索 .....	17
3.2 路径规划的分类 .....	18
3.3 几种典型路径规划 .....	18
3.3.1 人工势场法 .....	19
3.3.2 遗传算法 .....	19
3.3.3 模糊逻辑算法 .....	19
3.4 完全遍历规划描述 .....	20

3.4.1 遍历规划数学描述.....	20
3.4.2 完全遍历规划的性能指标.....	21
3.5 几种典型完全遍历路径规划.....	21
3.5.1 单元分解法.....	21
3.5.2 模板模型法.....	22
3.6 基于矩形分解法的完全遍历算法.....	23
3.6.1 基于矩形分解法的完全遍历算法思想.....	23
3.6.2 全局路径规划.....	24
3.6.3 局部路径规划.....	26
3.6.4 基于矩形分解法的完全遍历算法总结.....	29
3.6.5 完全遍历算法流程.....	31
3.7 遍历算法仿真及分析.....	31
3.7.1 仿真结果.....	31
3.7.2 仿真结论.....	32
3.8 本章小结.....	32
<b>第四章 移动机器人的嵌入式环境感知系统.....</b>	<b>33</b>
4.1 移动机器人系统中的传感器技术.....	33
4.2 嵌入式环境感知系统.....	34
4.3 超声波测距模块.....	35
4.3.1 超声频率特性.....	35
4.3.2 超声波测距工作原理.....	36
4.3.3 超声波测距系统硬件电路.....	37
4.4 多路红外探测模块.....	42
4.5 地磁场传感器模块.....	43
4.6 系统控制芯片.....	43
4.7 其外围芯片.....	44
4.7.1 复位电路.....	45
4.7.2 通讯电路.....	45
4.8 电源电路.....	45
4.9 其他电路.....	46
4.10 本章小结.....	46
<b>第五章 移动机器人完全遍历控制系统.....</b>	<b>47</b>
5.1 完全遍历系统硬件构成.....	47
5.2 ARM主控板系统.....	47
5.2.1 主板LPC2210CPU概述.....	48
5.2.2 RS232 通讯电路.....	49
5.2.3 脉宽调制器(PWM)电路.....	49
5.2.4 A/D转换器.....	49
5.3 电机驱动系统.....	50
5.3.1 直流电机驱动概述.....	50
5.3.2 直流电机驱动系统组成.....	50
5.3.3 无线遥控模块.....	51

5.3.4 直流电机驱动模块.....	52
5.3.5 位置信息反馈模块.....	54
5.3.6 其他模块.....	57
5.4 完全遍历系统控制流程.....	57
5.4.1 各系统功能.....	57
5.4.2 系统间的信息接口.....	58
5.4.3 系统控制流程.....	59
5.5 本章小结.....	59
<b>第六章 总结与展望 .....</b>	<b>60</b>
6.1 总结.....	60
6.2 展望.....	60
<b>致 谢 .....</b>	<b>62</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>63</b>
<b>作者在攻读硕士学位期间发表的论文 .....</b>	<b>68</b>



## 第一章 绪论

### 1.1 课题研究背景与意义

千百年来,人类用智慧创造了璀璨的文明,也使自己的生活日趋轻松便捷,不计其数的工具、机器在各个领域简化着我们的工作、生活,1921年产生了“机器人”(robot)这一名词。自从本世纪六十年代工业机器人诞生以来,伴随着计算机和自动化技术的迅速发展和应用领域的不断扩展,对机器人的智能性的要求也越来越高。目前具有一定的智能性的自主式移动机器人(以下简称移动机器人)是研究热点之一。

移动机器人的研究开始于70年代末。斯坦福研究院(SRI)的Nils Nilsson和Charles Rosen等人在1966年至1972年中研究制造出名为Shakey<sup>[1]</sup>的自主移动机器人。70年代后期,由于计算机和传感技术的应用与发展,移动机器人的研究又出现了一个新的高潮。80年代中期以来,一批配备有超声波、视觉等传感器、图像处理、微机控制器的多处理机的移动机器人相继问世,具有代表性的如:CMU Nanlab、Martin Maritetta Alvin、Texas A & M大学BART以及德国联邦国防军大学的VaMoRs等。90年代以来,以研制高水平的环境信息传感器和信息处理技术,高适应的移动机器人控制技术,真实环境下的规划技术为标志,开展了移动机器人更高层次的研究<sup>[2-4]</sup>。移动机器人正向着具有自组织、自学习、自适应的智能化方向发展。

随着相关技术研究的日益增加,传感器技术的日益提高,移动机器人受到了越来越多应用领域的关注,他们大多工作在非结构化和不确定环境中,例如:制造业、采矿业、建筑业、垃圾处理、太空探索、深海作业、军事侦察等。以往的移动机器人通常是用于工业应用的,但随着移动机器人技术的成熟,出现了所谓的服务机器人,用以代替需要较少技能的服务人员。清洁机器人在服务机器人领域中应用是最广泛的。大面积宽阔地面的清洁工作一直是项繁重的体力劳动,人工清洁费时、费力且工作效率低,将机器人用于清洁服务,具有广阔的应用前景。目前在一些发达国家,已经开始采用服务机器人完成对工厂、车站、机场和办公室等宽阔地段的清洁工作。对清洁机器人的研究几乎包括了所有机器人的研究领域,因此吸引了许多研究者和工程师<sup>[5-9]</sup>。

不同于其它移动机器人的工作要求,清洁任务要求机器人清扫所有的工作空间,符合这个要求的路径规划就是完全遍历路径规划。随着商用和家用清洁机器人产业化进程的推进,遍历路径规划的研究越来越受到关注和重视<sup>[10]</sup>。遍历路径规划是一种特殊的路径规划方法,它涉及到一条可行路径的规划,以便使机器人运行轨迹充满一整块区域,也就是指机器人完全覆盖所有无障碍区域的运动。不仅清洁机器人要求遍历路径规划,其他许多机器人也同样要求遍历路径规划,比如草坪修剪机、自主收割机、水下机器人、游泳池清洗、壁面清洗机器人、自主地面矿藏探测器、军事上的自主排雷等。因此,遍历路径规划的研究有深远意义。

### 1.2 国内外研究现状

早在二十世纪七十年代,人们就开始了对机器人路径规划的研究。在过去几十年中,已有大量的研究工作被投入到路径规划这一领域,并且涌现了很多路径规划方法<sup>[7]</sup>。路径规划的方法主要有:人工势场法<sup>[11-22]</sup>、栅格法<sup>[19][23-24]</sup>、拓扑法<sup>[25-27]</sup>、滚动规划方法<sup>[28-32]</sup>、启发式方

法、遗传算法<sup>[33-35]</sup>和其他混合方法。上述的路径规划方法各有优缺点,没有一种方法能适用于任何的环境信息。其中人工势场法结构简单,便于低层的实时控制,在实时避障和平滑的轨迹控制方面,得到了广泛的应用;但对存在的局部最优解的问题,容易产生死锁现象,因而可能使机器人在到达目标点之前就停留在局部最优点。栅格法简单,易于实现,为路径规划的实现带来了很多方便,具有表示不规则障碍物的能力,其缺点是表示效率不高,存在着时空开销与精度之间的矛盾。启发式算法的优点效率高,但是很难确定合适的启发信息。基于滚动窗口的路径规划机器人充分利用探知的局部信息,在滚动中有效地结合了优化和反馈,不仅局部计算量保持在较低水平,而且保证了全局的收敛性。这些优点使滚动算法能很好地适应环境的变化,这在机器人工作环境存在动态不确定障碍时将会显得尤为突出。

上述路径规划方法都是针对点到点的路径规划的,随着商用和家用清洁机器人产业化进程的推进,遍历路径规划的研究越来越受到关注和重视。遍历路径规划方法不同于通常所说的点到点规划的方法,遍历规划是在满足某种性能评价指标最优的前提下寻找一条在设定区域内从始点到终点且经过所有可达点的路径规划;而点到点规划的目标是寻求一条从始点到终点的无碰撞最优路径。遍历规划归纳起来大致分为两种:随机遍历规划和完全遍历规划。随机遍历规划即机器人无法直行时就随机转过某一角度继续直行,该方法不需要定位传感器,算法简单,但效率比较低。采用随机遍历规划的清扫机器人在不惜时间的条件下,清洁面积可以趋向100%。目前,家用清洁类机器人多数采用此种方法。完全遍历规划采用某种性能评价函数来控制机器人的遍历运动,以使性能评价函数最优。性能评价函数通常为清洁效率、清洁面积百分率、清洁重叠率、或能量消耗等。在遍历类移动机器人的路径规划研究中,完全遍历路径规划备受关注。研究遍历路径规划的方法有:近似单元分解法<sup>[36]</sup>(Approach Cellular Decomposition),精确单元分解法<sup>[37]</sup>(Exact Cellular Decomposition),模板模型法<sup>[38]</sup>(Template Based Model),神经网络(Neural Network)<sup>[39]</sup>,模糊逻辑(FUZZY Logic)<sup>[40]</sup>,基于行为的路径规划<sup>[9]</sup>(Behaviours Based Approach),基于传感器信息的路径规划(Sensor Based Coverage)等等。

目前,常用的遍历算法是模板模型法和单元分解法<sup>[48-50]</sup>(细胞分解法)。在这两种算法中,单元分解法更具优越性,具有很好的发展前景。模板模型算法是一种利用模板进行遍历的算法。由于模板算法对整个环境缺乏整体的规划,该算法效率较低并且机器人往往会进入无法处理的死循环状态。基于模板模型的完全遍历路径规划,它要求事先定义环境模型和模板的记忆,因此对于变化着的环境就不好处理,比如机器人在遍历工作过程中突然出现一个障碍等。单元分解法是根据障碍物分布情况将环境空间划分为一系列不重合的、有限个的、无障碍物的区间,而后在此基础上进行每个区域的遍历。单元分解法分为:近似单元分解法和精确单元分解法。相比近似单元分解法,精确单元分解法具有更好的研究前景。目前有两种主要的精确单元分解算法:Trapezoidal算法<sup>[11]</sup>和Boustrophedon算法<sup>[47]</sup>。Trapezoidal算法将环境分解成梯形块,移动机器人分别在各个梯形块中进行往复移动来进行遍历,Boustrophedon算法是对Trapezoidal算法的改进,目的是减少由于分块过多而造成重复遍历。

基于生物激励神经网络的路径规划方法是一个新颖的路径规划方法,该方法不同于其他的神经网络方法,不需要学习过程,具有很好的实时性,在路径规划时能跳出死锁情况,对噪声、模型参数的变化都不敏感,而且计算量不大,计算简单,不需要先验环境信息。

路径规划的第一步就是建立适当的环境模型。任何一种规划算法都与某种特定的环境建模技术相对应的。环境模型有静态确定模型和动态时变环境模型。目前大多数研究工作集中于静态路径规划,但动态路径规划问题已引起人们的注意。对于静态已知的环境,已有不少成功的研究成果,其建模技术也是相对较为成功的。另一方面,部分已知或完全未知环境的路径规划问题没有得到完善的解决,其根本原因在于难以建立有效的环境模型<sup>[42-45]</sup>。

### 1.3 课题研究内容

路径规划技术是机器人领域中的核心问题之一,也是机器人学中研究人工智能的一个重要方面。移动机器人的路径规划就是给定机器人工作环境信息,按照某种优化指标,在起始点和目标点之间规划出一条与环境障碍物无碰撞的路径。它是机器人执行各种任务的基础,反映了机器人在运动过程中与周围环境的交互能力。完全遍历路径规划是路径规划中一种特殊情况,其目标不是寻找到目标点无碰撞路径,而是寻找可以遍历空间所有可达到的区域的无碰撞路径。很显然,完全遍历路径规划比传统的点对点路径规划更复杂。移动机器人完全遍历路径规划主要完成的任务是:(1)在环境的途中寻找一条路径,保证移动机器人沿该路径移动时不与外界碰撞并且可以遍历环境所有可达空间;(2)利用自身的环境感知系统能够识别和处理环境建模中的不确定因素和路径执行中出现的误差;(3)移动机器人能够自主避开外界干扰物体而使其对自身环境感知系统的影响降到最小;(4)能够按照需要找到最优路径。

本课题面向工作在室内的清洁类移动机器人,利用多种传感器建立环境感知系统,并在此基础上进行环境建模和完全遍历路径规划。目前,移动机器人的环境建模技术比较成熟,可适应室内环境建模的方法却不多。对室内环境建模要考虑以下几个因素:(1)室内难以建立路标,通过路标法进行环境建模的方法行不通;(2)针对清洁类的服务机器人要面向社会,成本要低,高代价的传感器不可用;(3)室内环境相对复杂,难以对移动机器人绝对定位。超声波传感器的造价低廉、速度快、距离分辨率较高,通过信息融合可较准确地反映环境信息。针对室内清洁服务移动机器人,利用超声波传感器实现环境地图构建,显然是经济可行的方法。所以,我们利用超声波传感器、地磁场传感器和红外线传感器建立了环境感知系统。该系统可以正确地感知环境,引导移动机器人顺利完成避障、路径跟踪和路径规划等任务。

在建立环境感知系统的基础上,利用其测距离、判方向和探测等功能对环境建模,综合各种环境建模的优点,文中提出了针对室内环境完全遍历路径规划的新的环境建模方法——矩形环境建模法。该环境建模方法简单有效,能够对未知环境进行环境建模,特别适应于完全遍历路径规划的环境建模。信息存储量很小,克服了栅格法环境信息存储量大的困难,避免栅格法的全局定位;建立全局交错网络远比拓扑网络建立简单。

移动机器人路径规划是移动机器人研究瓶颈问题之一,之所以难是因为很难解决移动机器人全局定位问题。对环境矩形建模就克服了全局定位的问题,同时在矩形子空间中建立直角坐标,实现定位是可行的。子空间之间的用交错网络连接,搜索子空间是用线性搜索的方法。子空间在空间上呈阵列分布,我们通过子空间在空间上的位置和方向来搜索子空间。子空间是连通的,可以采用模板法方法进行遍历,于是产生了基于矩形分解法的完全遍历算法。该算法将全局遍历难度划分成若干局部区域遍历的难度,遍历难度显然减小了。

针对路径规划问题和环境建模,虽然人们已经提出了很多方法和策略,但远没有形成一套完整的方法和理论。路径规划问题的本质是在障碍物环境中为机器人规划出一条优化的运动路径,其难点在于如何有效利用已知的环境信息。完全遍历路径规划是一种特殊的路径规划方法,研究完全遍历路径规划有很大的实用价值和经济效益。但是到目前为止,完全遍历路径规划的研究还处于起步阶段。遍历路径规划应用的环境模型简单化,其中的障碍物都是规则形状的,而且路径规划的智能性低,还没有形成一个比较全面、权威的性能指标,对于动态未知环境中的遍历路径规划,还没有很好的解决。本文在分析和综合了国内外完全遍历路径规划的研究工作,借鉴其中的优点,立足弥补其中的不足,系统地研究了移动机器人的遍历路径规划,针对静态环境下的路径规划都进行了详细的讨论和分析,提出了基于栅格拓

扑法的矩形环境建模法，并在此基础上研究在未知环境中的完全遍历算法。

## 1.4 本文章节划分

本文以室内清洁移动机器人为研究对象，在对移动机器人环境建模和遍历路径规划相关理论进行详细分析的基础上，提出应用于室内清洁移动机器人遍历导航的环境建模方法和完全遍历算法，同时设计用于移动机器人环境建模和完全遍历路径规划的环境感知系统。重点进行了以下方面的研究工作：

- 1) 系统地分析了当前移动机器人环境建模技术，包括栅格法、几何法、拓扑法等方法。在此基础上，综合栅格法和拓扑法的优点提出了一种新的环境建模法——矩形环境建模法。该方法利用单元分解法思想将环境划分成若干个矩形区域，在矩形区域内和区域间建立基点和交错网络信息，有利于移动机器人路径规划；
- 2) 详细分析叙述了几种典型的路径规划方法——人工势场法、遗传算法、模糊逻辑法等，针对完全遍历路径规划算法又介绍了单元分解法和模板模型法这两种常用方法。在矩形环境建模基础上，我们建立了基于搜索规则的完全遍历算法。该方法简单、实用，对传感器要求比较低。最后，通过软件仿真来验证该完全遍历算法的有效性；
- 3) 针对提出的完全遍历算法对环境感知的要求，研制开发了基于ARM的嵌入式感知系统，整个环境感知系统由超声波传感器、红外线传感器和地磁场传感器组成。分析了超声波传感器的工作原理和相关特性，研制了多路超声波测距仪。
- 4) 针对移动机器人完全遍历系统，描述了各个模块的功能及相互间通讯接口，并研制了闭环的电机驱动系统。

## 1.5 本章小结

本章叙述了移动机器人发展过程及研究路径规划的意义，同时介绍了移动机器人路径规划研究的内容及遍历路径规划研究的现状。最后，介绍了本文要研究的内容。

## 第二章 基于栅格拓扑法的移动机器人环境建模研究

移动机器人的路径规划是智能机器人研究中的一项关键技术,而路径规划的第一步就是建立适当的环境模型,环境建模一直是移动机器人研究中的热点问题<sup>[54, 55]</sup>。移动机器人在路径规划前首先要进行环境建模,所谓环境建模就是机器人在对环境感知的基础上,利用信息融合技术实现环境结构描述的过程,对其活动环境实现感知与建模的过程。通过该过程将外部现实环境转换成便于系统识别和处理内部数字模型,特别是建立了自由空间、障碍物和目标的表示方法。任何一种规划算法都与某种特定的环境建模技术相对应的。合理的环境建模有利于规划中搜索量的减少,有利于“时空”开销的减少,不同的环境建模方法就决定了不同的路径规划方法。

### 2.1 环境地图描述

环境建模是实现机器人导航控制算法的基础,针对移动机器人非结构化环境,已有不少的环境建模方法,评价一个模型的好坏标准,不是其反映客观现实的精确性或数学描述的完美性,而是解决导航控制问题的有效性。片面的追求反映环境信息的精度,往往会导致问题的复杂化,影响算法的实时性稳定性和鲁棒性。因此,环境描述应当在精度与速度的权衡中,采用定性、定量相结合的方法,寻求一个针对特定环境最优的方案。地图是环境的模型,创建地图必须解决三个基本问题:

- (1) 如何表示环境地图,即地图的表示方法;
- (2) 怎样获得环境信息,机器人在环境中漫游并记录传感器的感知数据,这就涉及到机器人的导航问题;
- (3) 怎样表示获得的环境信息并根据环境信息更新地图,这里需要解决对不确定信息的描述和处理方法。

移动机器人工作环境大都具有一定的未知性和不确定性,但其工作性质、范围和环境类型等信息还是可预先得到的,有时甚至可以通过机器人自感知、自学习而获取。在实际复杂环境中,移动机器人依靠自身传感器系统实现环境地图构建,是体现高智能化的重要标志之一。为使机器人能在不确定环境中高性能地执行任务,机器人需要具有自主创建和更新环境模型的能力。

### 2.2 几种典型环境地图描述

目前,国内外对环境地图构建方法很多,根据表达方式的不同存在几种比较典型的方法:栅格法<sup>[23, 24]</sup> (Grid-based Map), 几何法(Geometric Map), 拓扑法<sup>[25, 26, 27]</sup> (Topological Map), 可视图法<sup>[51]</sup> (Visibility Graph Map) 和自由空间法<sup>[52, 53]</sup>, 其它各种方法均可归为上述几类<sup>[24, 56, 57]</sup>。

#### 2.2.1 栅格法环境地图建模

栅格法(Grid-based Map)就是在环境坐标系下,将机器人工作空间划分为若干个栅格,

并确定每个栅格中存在障碍物的置信度。在实现上,用一个二维数组表示机器人的工作区间,其中每个元素代表一个栅格,每个栅格具有一个可信度值CV (Certainty Value), 用于表示该区域内存在障碍物的可能性(如图 2-1)。在建立合理数学模型的基础上,栅格法对传感器探测精度的要求并不苛刻。该方法最早是由ALBERTO ELFES<sup>[58]</sup>提出,已成功地应用到许多移动机器人系统中。在栅格法环境建模过程中栅格大小的选取直接影响着控制算法的性能。栅格选的小,环境分辨率高,但抗干扰能力弱,环境存储量大,决策速度慢;栅格选的大,抗干扰能力强,环境信息存储量小,决策速度快,但环境分辨率低。栅格法定位精度高,对环境信息描述完备,但对复杂动态环境难以适应,尤其是中大型环境难以适应。环境栅格地图容易创建,便于维护,又可方便地实现机器人定位与寻航。所以基于栅格法的环境地图构建得到许多学者的青睐。

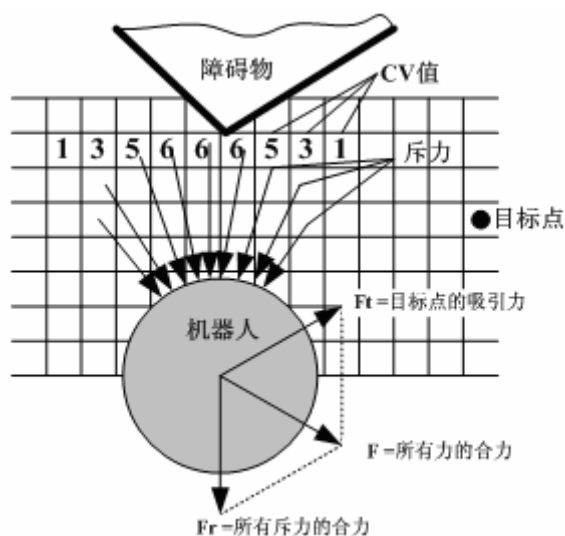


图2-1 栅格法环境建模

### 2.2.2 几何法环境地图建模

基于几何法的环境地图建模是常用的一种环境建模方法,是指机器人收集环境感知信息,从中提取更为抽象的几何特征,例如线段或曲线,使用这些几何信息描述环境。这种表示方法更为紧凑,且方便位置估计和目标识别。几何信息的提取需要对感知信息作额外的处理,且需要一定数量的感知数据才能得到结果。这种建模方法并不关心环境全局信息,而是着眼于环境中易于被感知识别的特征目标(或抽象特征点)的位置信息。相应地,移动机器人的定位导航则主要是通过特征目标(或抽象特征点)的匹配识别,来间接地得到自身的位置信息。

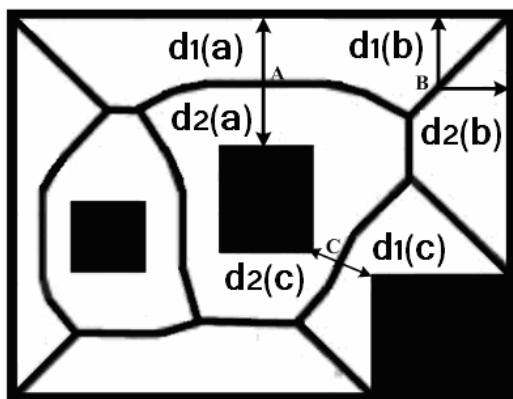
### 2.2.3 拓扑法环境地图建模

拓扑法(Topological Map)是一种紧凑的环境表示方法,它是借用图(Graph)的形式来描述环境的空间分布,利用节点来表示环境的特征点,用线段来表示环境中各特征点之间的连通关系。特征点和特征点之间的连线便构成了拓扑网络,在拓扑网络上寻找起始点到目标点的拓扑路径,最终由拓扑路径求出几何路径。

在定位过程中往往采用直接式的推理方法,以广义Voronoi图 (Generalized Voronoi

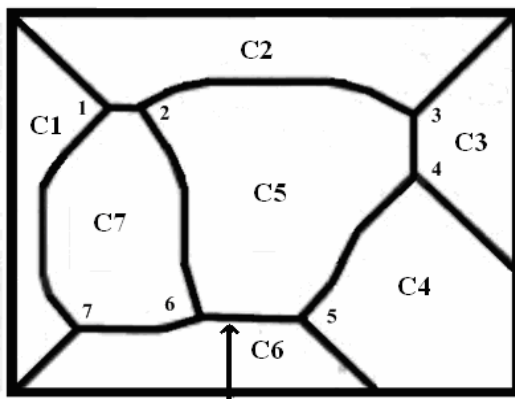
Graph, GVG) 方法为典型。GVG图是一张描述环境特征点(节点)相互位置关系的连通图(如图2-2), 由环境中可被声纳识别的特征构成节点, 各个节点之间连线构成边, 同时记录了环境的拓扑网络结构(如图2-3)。GVG方法规定机器人的移动轨迹, 结合对拓扑节点的识别, 把定位问题归结为判断机器人在拓扑网络上哪两个节点之间的问题, 可以在环境中跟踪机器人位置。

拓扑法并不关心环境细节信息, 而是从环境整体拓扑结构上来把握, 其计算效率比较高。这种表示方法简练实用, 对传感器测量噪声不是很敏感, 对环境的局部状态变化表现出了很好的鲁棒性, 便于机器人实现快速路径规划与导航<sup>[59]</sup>。如J. Kim<sup>[60]</sup>等基于环境拓扑地图实现了机器人的定位与导航。拓扑法主要缺点在于: 难以建立拓扑网络及如何提高图形速度是有待解决问题; 此外, 难以给出准确的定位信息, 特别是在局部环境“Look Alike”的场合和“Weak Meet Point”场合难以适应<sup>[61]</sup>。



$d_1(a)=d_2(a)$ ,  $d_1(b)=d_2(b)$ ,  $d_1(c)=d_2(c)$

图 2-2 拓扑网络



a point-GVD edge

图 2-3 拓扑路径

## 2.2.4 可视图法环境地图建模

可视图法(Visibility Graph)的基本思想是将机器人缩小为一个点, 同时根据机器人的形状和尺寸将障碍物进行拓展, 将所有障碍物的顶点和机器人起始点及目标点用直线相连, 这些直线均不能与障碍物相交, 即“可视的”, 然后采用搜索最优路径的问题就转化为从起点到目标点经过这些可视直线的最短距离问题。由于任意两直线的顶点都是可见的, 从起点沿着这些直线到达目标点的所有路径均是运动物体的无碰路径。运用优化算法, 可删除一些不必要的连线以简化可视图, 缩短搜索时间。该法实现简单, 但缺乏灵活性, 一旦起始点和目标点发生改变就要重新构造可视图, 而且算法的复杂性和障碍物的数量成正比, 且有时难以获得最优路径。该法能够求得最短路径, 但假设忽略移动机器人的尺寸大小, 使得机器人通过障碍物顶点时离障碍物太近甚至接触, 并且搜索时间长。

## 2.2.5 自由空间法环境地图建模

自由空间法<sup>[2]</sup>应用于移动机器人路径规划, 采用预先定义的如广义锥形<sup>[63]</sup>和凸多边形<sup>[64]</sup>等基本形状构造自由空间, 并将自由空间表示为连通图, 通过搜索连通图来进行路径规划。自由空间的构造方法<sup>[65]</sup>是: 从障碍物的一个顶点开始, 依次作其它顶点的链接线, 删除不必要的链接线, 使得链接线与障碍物边界所围成的每一个自由空间都是面积最大的凸多边形; 连接各链接线的中点形成的网络图即为机器人可自由运动的路线。其优点是比较灵活, 起始

点和目标点的改变不会造成连通图的重构,缺点是复杂程度与障碍物的多少成正比,且有时无法获得最短路径。

以上几种环境建模各有优缺点。栅格法是从局部着眼来建立环境地图,由局部扩展到全局。栅格地图很容易创建和维护,机器人所了解的每个栅格的信息直接与环境中的某区域对应,使用声纳这样的廉价传感器即可获得创建地图的信息并加入到地图中。借助于该地图,可以方便地进行自定位和路径规划,同时,栅格法使得对移动机器人的控制算法简单。栅格法全局信息的精度受传感器的精度影响,全局信息是由局部信息推算出来的,由于误差的累积,很难实现全局精确定位;另外,当栅格数量增大时(在环境空间较大或对环境划分比较详细时),对于地图的维护行为所占用的内存和CPU时间迅速增长,使计算机的实时处理变得很困难。几何法则是从环境特征目标集的角度来建立环境地图,该建模方法不关心环境全局信息,而是关注环境中特征目标的位置信息,这样环境的定位比较容易,但机器人为识别环境中的特征目标需要付出相当的代价,一般难以适应复杂动态的环境,路径规划求解效率有时比较低。拓扑法是从全局角度来建立环境地图,对传感器要求不高,代价低。不过难以建立环境的拓扑网络,尤其对复杂的环境。而且对移动机器人控制困难,算法复杂。可视图法实现简单,但缺乏灵活性,而且与环境的复杂度成正比,在复杂的环境下路径复杂,而且很难找到最优路径。

总之,这些方法各有优缺点,要根据实际场合加以灵活地选择和应用。近年来,不少学者提出复合环境建模方法,将几种方法进行综合应用<sup>[24][59][60]</sup>。如:在路径规划和导航控制时采用拓扑法,在机器人定位与障碍物检测上则采用栅格法。对于大中型环境,可先将环境划分为各个区域,区域间采用拓扑方法建模,区域局部环境则采用栅格法,这种处理方式是值得采用的需要指出的是,无论采用什么方式,环境地图构建的好坏之标准要根据具体的场合和任务来定。

## 2.3 环境定位

环境定位是移动机器人环境建模和路径规划的基础。在移动机器人的应用中,精确的位置信息是一个基本的问题。移动机器人的准确定位是保证其正确完成导航、控制任务的关键之一。有关位置的测量,可分为两大类:相对和绝对位置测量。常用的定位实现方法有:里程计、惯性导航、磁罗盘、主动灯塔、全球定位系统、路标导航和地图模型匹配和仿生物导航技术等。

针对室内复杂的应用环境,在低成本的前提下难以实现精确的绝对定位,本文采用相对位置测量方法对环境定位。相对位置定位就是用移动机器人在其周围八个方向上到环境或障碍物的八个距离信息来表征该点坐标信息。在距离测量精度比较高的情况下,对环境局部区域的点用该方法定位显然是可行的。在下一章中将介绍移动机器人环境感知系统,该系统利用超声波传感器、红外线传感器和地磁场传感器来感知环境和对环境定位。其中,超声波传感器和地磁场传感器是用于移动机器人定位和环境感知,红外线传感器时用于在遍历过程中探测障碍物。下面主要讨论环境建模中的移动机器人定位问题。

### 2.3.1. 距离测量

系统中使用超声波传感器来测量距离,超声波传感器工作原理是:发射换能器发射超声波经障碍物后反射回来,接收换能器接收反射回来的超声波,由超声波发射到接收的时间便可计算出距离,测量的原理如图 2-4。



由于车身大小不能忽略，必须将超声波测量的距离换算成障碍物到车体的距离。在图 2-5 中，定义移动机器人后面两个轮子中心点  $O$  为车体中心，在车体坐标系  $XOY$  中参数定义如下：

- $r$  — 超声波传感器到车体中心距离；
- $\beta$  — 超声波传感器探头测距方向与车体中心轴夹角；
- $\gamma$  — 超声波传感器偏离车体中心角度；
- $d$  — 超声波传感器测距数值。

那么，车体到障碍物的距离  $Do$  和障碍物与车体中心轴夹角  $\alpha$  表示如下：

$$Do = \sqrt{(r\sin\gamma + d\sin\beta)^2 + (r\cos\gamma + d\cos\beta)^2} \quad (2.1)$$

$$\alpha = \arctan \frac{r\sin\gamma + d\sin\beta}{r\cos\gamma + d\cos\beta} + n * 90^\circ (n = 0, 2, 3, 5) \quad (2.2)$$

当障碍物落在第一象限， $n=0$ ；当障碍物落在第二、第三象限， $n=2$ ；当障碍物落在第四象限， $n=4$ 。

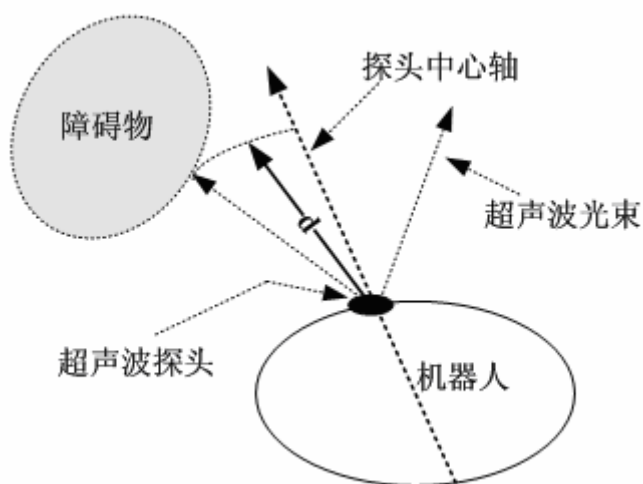


图 2-4 超声波测距示意图

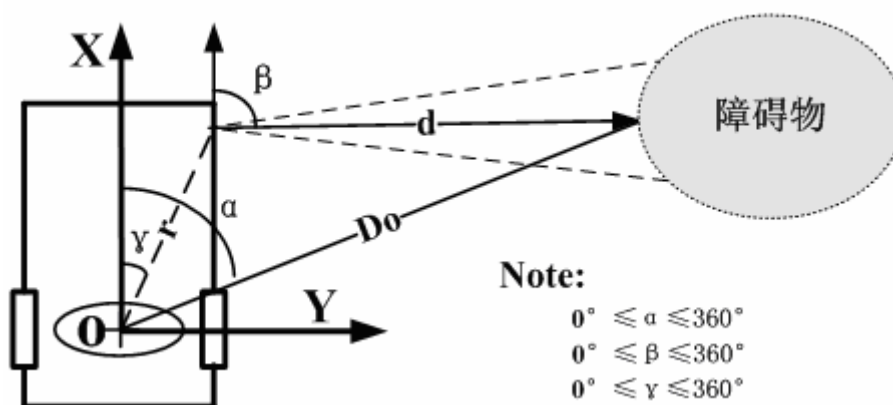


图 2-5 超声波测距参数

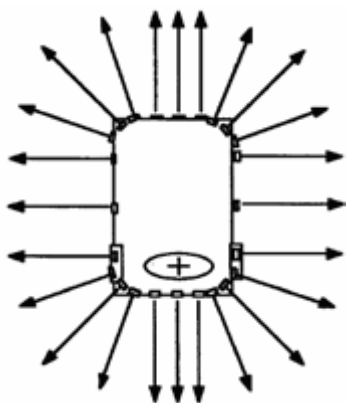


图 2-6 超声波传感器安装示意图

### 2.3.2 相对坐标法

相对位置测量即用移动机器人四周安放的超声传感器测得的八个方向上的距离信息作为移动机器人车体位置信息。移动机器人四周的八个方向上安放了 24 个超声波传感器，每个方向上安装三个（如图 2-6）。为了表示方便，本文中规定 A、B、C、D、E、F、G、H 八个方向依次为方向 0，1，2，3，4，5，6，7（如图 2-7）。每个方向上三个传感器测量值在该方向上的投影值中的最小值作为该方向传感器测距有效值。于是，八个方向上的传感器距离有效值计算公式如下：

$$d_i = \min(d_{i1}, d_{i2}, d_{i3}) \quad (i = 0, 1 \dots 7) \quad (2.3)$$

$d_{i1}, d_{i2}, d_{i3}$  分别为第  $i$  方向上三个传感器测量距离在  $i$  方向上投影值。

每个方向上车体中心距离障碍物的距离公式如下：

$$D_i = \sqrt{(r_i \sin \gamma_i + d_i \sin \beta_i)^2 + (r_i \cos \gamma_i + d_i \cos \beta_i)^2} \quad (i = 0, 1 \dots 7) \quad (2.4)$$

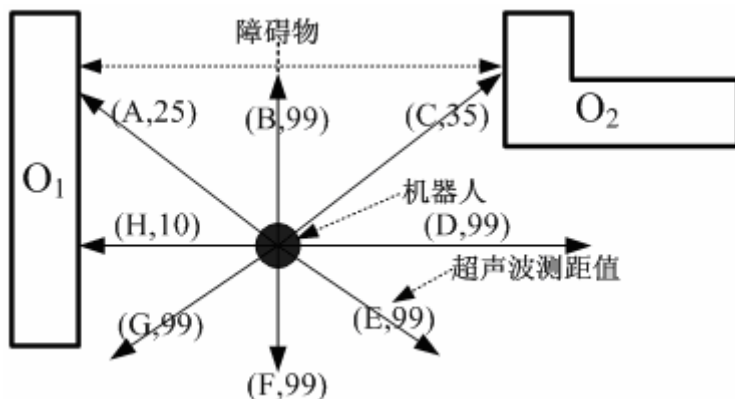


图 2-7 超声波测距数值

这样，就可以用 A、B...H 八个方向上的距离数组建立车体相对坐标。如图 2-7，假设 A、B...H 方向上的测量距离数值分别为：25、99、35、99、99、99、99、10，那么，车体相对位置坐标为  $P_0[25, 99, 35, 99, 99, 99, 99, 10]$ 。在现实环境中由于障碍物的存在，环境中不同位置的相对坐标一般是不同的。用这种方法就可以识别局部区域中的一些位置，用这种相对位置定位的方法就叫做叫相对位置定位。

### 2.3.3 移动机器人定位

当移动机器人处在某一方向时,便可通过安装在其四周的超声波传感器测得当前相对位置坐标。在同一位置,移动机器人方位不同就会导致超声波测量距离不同,从而计算的相对位置坐标也不同。为了使局部环境中的点具有唯一的相对位置坐标,就必须事先确定测量相对位置坐标时移动机器人在环境中的方位。我们规定移动机器人指向地磁场N方向时,超声波传感器测得的数据值为该点的相对位置坐标值,用该坐标来定位移动机器人。环境感知系统中的地磁场传感器就是用来调整移动机器人方位,配合超声波传感器完成环境定位。

## 2.4 矩形环境地图建模

在面向工作在半结构化环境中的一类室内服务移动机器人,利用超声波传感器实现环境地图构建,显然是经济可行的方法。由于栅格法便于地图创建与维护、建模方法简单实用,在自主移动机器人遍历系统中,本文综合栅格拓扑的优点并结合前一节提到的相对位置定位方法建立基于栅格拓扑法的矩形环境地图模型,并以具体实验进行深入分析。

### 2.4.1 矩形环境地图建模思想

矩形环境地图建模思想:将环境划分成不等的矩形区域,每个矩形区域中有一个表征该区域的特征点(基点),基点与矩形区域一一对应。基点间线段表示基点间的连通关系,基点与线段就构成了整个环境交错网络。在交错网络上寻找起始点和目标点的几何路径。在矩形环境地图建模描述前,先提出几个概念:

**基点:**矩形环境地图建模中首先将环境划分成若干相等区域,取每个区域中心点为表征该区域的特征点,称此特征点为基点。

**基点间通断路:**若两基点间存在连通的线段,那么这两个基点间为“通路”;若两基点间不连通为“断路”。

**虚实基点:**若某区域的基点处存在障碍物,定义该基点为“虚基点”,否则为“实基点”。

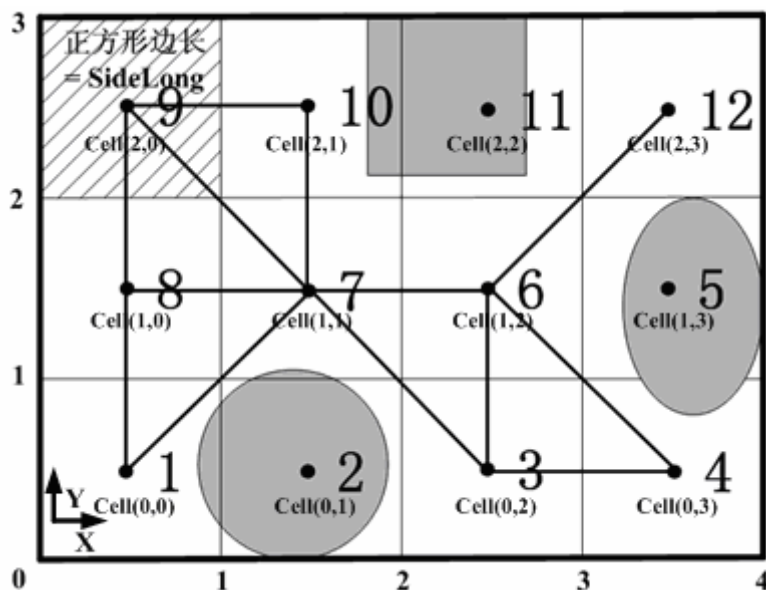


图2-8 正方形环境建模

### 2.4.2 正方形环境建模

矩形环境建模的第一步是建立环境的正方形模型，这是矩形建模的基础。正方形环境建模就是将环境空间划分成若干大小相等的正方形区域，每个正方形区域的中心就是表征该区域的基点。正方形地图的信息包括正方形边长信息、基点信息和基点间信息。正方形边长信息就是划分环境的正方形边长大小，为了便于表示，我们定义正方形边长SideLong为一个单位长度（如图2-8）。基点信息分为：基点虚实信息、相对位置信息和空间位置信息。基点虚实信息就是基点是“虚基点”还是“实基点”，在图2-8中，基点2、5、11为“虚基点”，其它基点为“实基点”。相对位置信息就是基点的相对位置坐标，图2-8中基点9的相对位置坐标 $P_9=[0.7, 0.5, 0.7, 1.3, 3.5, 2.5, 0.7, 0.5]$ 。空间位置信息就是基点坐在空间的绝对空间位置。把正方形区域看作环境的细胞，整个环境就是由正方形细胞阵列组成。每个细胞就是阵列上的一个元素，基点在空间上的位置与细胞在阵列中的空间位置一一对应。这样就确定了基点的空间位置信息。如图2-8所示，基点1的空间位置坐标为Cell(0, 0)，基点10的空间位置坐标为Cell(2, 1)。基点的空间信息是在移动机器人导航过程中自主建立起来的。基点间信息为基点间的“连通”关系，用“通路”表示基点连接，“断路”表示基点断开。图2-10中基点1、7“通路”，基点2、7“断路”。移动机器人建立正方形地图过程如下：

(1) 设定正方形边长大小，人工引导移动机器人“沿边”学习（如图2-9）。“沿边”学习就是机器人执行距离环境四围半个正方形边长长度跟踪一周，得到一个环境轮廓。经过这个过程，确立环境的大小，确定划分环境的正方形区域数目并且建立环境四周的基点信息。在实际环境中移动机器人“沿边学习”，在人工引导下，并借助自身环境感知系统，通过电机的脉冲编码器和地磁场传感器相互配合完成环境距离的测量（详见第四章环境感知系统）。环境中正方形区域数目计算公式如下：

$$C_{num} = m * n \quad (2.5)$$

$$m = INT(ED_{length} / SideLong) \quad (2.6)$$

$$n = INT(ED_{width} / SideLong) \quad (2.7)$$

其中， $m$ ， $n$ 为分别环境空间 $x$ ， $y$ 轴方向的正方形数目， $ED_{length}$ ， $ED_{width}$ 分别为环境空间 $x$ ， $y$ 轴方向的距离长度，即环境的长和宽。

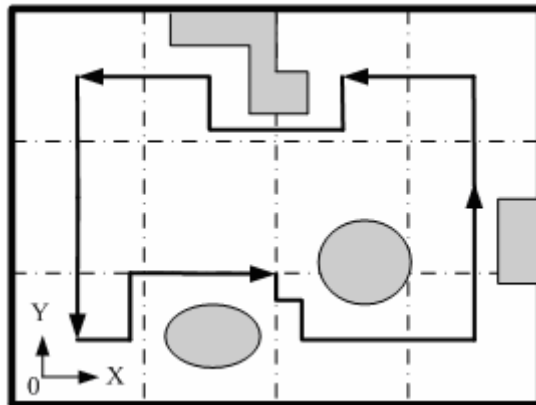


图2-9 “沿边”学习

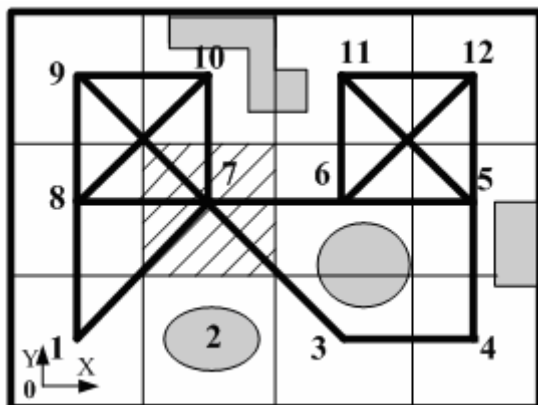


图2-10 正方形环境建模

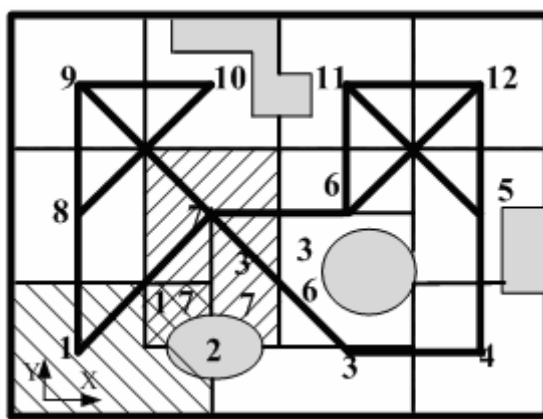


图2-11 矩形环境建模

(2) 以环境四周的基点为基准，建立环境中其它基点信息。搜索未知基点和建立未知基点信息是在移动机器人完全遍历过程中自主完成的，即实现了在未知环境中的定位。

(3) 综合环境中所有基点信息，建立环境电子地图并更新其中的部分数据。为以后的遍历导航提供数据参考。环境的电子地图在下一节作详细介绍。

### 2.4.3 矩形环境建模

由于现实存在许多障碍物，依照正方形地图模型难以实现移动机器人的完全遍历。基于正方形地图结合现实环境建立矩形地图就很必要。矩形地图是在正方形地图基础上选择性放大障碍物附近的正方形区域得到的，障碍物附近的正方形区域是否放大是由基点间的通断关系决定。具体方法是：

(1) 选择某存在“实基点”的正方形区域，判断该基点与相邻的上下左右四个基点是否“通路”。存在“通路”的那个方向上的正方形边界不变作为矩形的对应边界。图 2-10 中基点 7 和基点 10 相通，那么，基点 7 所在的正方形矩形化时，该正方形上边界就直接作为对应矩形的上边界（见图 2-10、2-11 阴影部分）。

(2) “不通”方向上的正方形边界要移动，移动的距离由该方向上三组传感器测得的距离数值决定。假设“下不通”，选取正方形右边三个方向（E、F、G 方向）上的距离值 Y 轴分量中最大值与正方形边长比较，若该数值大于正方形边长值，则取边长值为矩形下边界与基点间的距离；若该数值小于正方形的边长值，则取该数值为矩形下边界与基点间的距离。图 2-10 中基点 7 与基点 2 不通，则基点 7 “下不通”。选取 E、F、G 三个方向上的距离值 Y

轴分量中最大值与正方形边长比较。很显然，最大值大于正方形边长 1，就取 1 作为该正方形矩形化后的矩形下边界距离基点 7 的距离。

(3) 将所有含有“实基点”的正方形区域矩形化，就得到了环境的矩形建模地图，图 2-11 就是图 2-10 矩形化后的结果。

从上面可以看出，将正方形区域变成矩形区域的方法就是以正方形的中心为基准，改变正方形的四个边界从而得到对应的矩形。矩形边界到基点距离可以表示如下：

$$\begin{aligned} D_v &= \text{Max} (|D_{i-1} * \cos \alpha_{i-1}|, |D_i * \cos \alpha_i|, |D_{i+1} * \cos \alpha_{i+1}|) \quad (i=1, 5) \\ D_h &= \text{Max} (|D_{i-1} * \sin \alpha_{i-1}|, |D_i * \sin \alpha_i|, |D_{i+1} * \sin \alpha_{i+1}|) \quad (i=3, 7) \end{aligned} \quad (2.8)$$

式 2.8 中  $\alpha_i$  ( $i=0 \dots 7$ ) 为第  $i$  方向的超声波传感器探测到的障碍物到移动机器人中心方向与移动机器人坐标系 X 轴之间的夹角 (如图 2-5 所示)。

$$D_{hv} = \begin{cases} D_v, & (i=1, 5) \\ D_h, & (i=3, 7) \end{cases} \quad (2.9)$$

$$D_{hv\_edge_i} = \begin{cases} 0.5 & (\text{当前基点与其}i\text{方向相邻基点“相通”}) \\ D_{hv} & D_{hv} \leq 1 \\ 1 & D_{hv} > 1 \end{cases} \left\{ \begin{array}{l} (\text{当前基点与其}i\text{方向相邻基点“不通”}) \end{array} \right\} (i=1, 3, 5, 7) \quad (2.10)$$

以矩形区域基点为原点，建立矩形区域的直角坐标系。那么，矩形区域范围可表示为：

$$\begin{aligned} X_{\min} &= -D_{hv\_edge_7} \\ X_{\max} &= D_{hv\_edge_3} \\ Y_{\min} &= -D_{hv\_edge_5} \\ Y_{\max} &= D_{hv\_edge_1} \end{aligned} \quad (2.11)$$

(4) 记录每个矩形区域范围信息  $X_{\min}$ 、 $X_{\max}$ 、 $Y_{\min}$ 、 $Y_{\max}$ ，并更新环境电子地图。

#### 2.4.4 矩形环境电子地图建立

以上讨论了基于相对位置定位的环境建模方法——矩形环境建模方法。那么如何处理矩形环境模型呢？我们采用“电子地图”的形式。“电子地图”采用矩形网络的形式，每个网络代表一个实际物理区域，并对应可以描述这一区域情况的数据：区域序号，基点虚实，是否遍历，区域范围，与周围区域通路情况。采用十二维矢量的形式进行描述：

$$EGI(i, j) = (S_{ij}, K_{ij}, R_{ij}, F_{ij}, XL_{ij}, XR_{ij}, YD_{ij}, YU_{ij}, TAE_{ij}, TBF_{ij}, TCG_{ij}, TDH_{ij}) \quad (2.12)$$

式中： $i, j$  — 表示网络中位置 ( $i=0, 2 \dots m-1, j=0, 2 \dots n-1$ )；

$S_{ij}$  — 表示矩形区域  $Cell(i, j)$  序号；

$K_{ij}$  — 表示该区域是已知还是未知，1代表“已知”，0代表“未知”；

$R_{ij}$  — 表示该区域基点的虚实，1代表“实”，0代表“虚”；

$F_{ij}$  — 表示该区域是否遍历，1代表遍历，0代表未遍历；

$XL_{ij}, XRL_{ij}, YD_{ij}, YU_{ij}$  — 表示矩形区域  $Cell(i, j)$  四边界坐标值，由此确定该矩形区域范围；

$TAE_{ij}, TBF_{ij}, TCG_{ij}, TDH_{ij}$  — 表示A, B … H八个方向上的通路情况，如  $TAE_{ij}$  表示A、E

方向通路情况,其取值范围为0, 1, 2, 3。0代表A、E两方向均不通,1代表A方向不通且E方向通,2代表A方向通且E方向不通,3代表AE方向都通。 $TBF_{ij}$ ,  $TCG_{ij}$ ,  $TDH_{ij}$ 表示方法与此相同。

式中 $S_{ij}$ ,  $K_{ij}$ ,  $R_{ij}$ ,  $F_{ij}$ ,  $XL_{ij}$ ,  $XRL_{ij}$ ,  $YD_{ij}$ ,  $YU_{ij}$ ,  $TAE_{ij}$ ,  $TBF_{ij}$ ,  $TCG_{ij}$ ,  $TDH_{ij}$ 分别叫做序号矩阵,遍历矩阵,基点虚实矩阵,区域左、右、下、上边界距离矩阵,AE、BF、CG、DH方向通路矩阵。上述所有矩阵都是 $m \times n$ 的二维矩阵,所有矩阵的 $i$ 行 $j$ 列数的组合就构成了环境空间 $Cell(i, j)$ 的环境信息。

在下一章中,将利用该环境电子地图进行完全遍历路径规划。

#### 2.4.5 矩形环境地图建模优缺点

矩形环境建模将环境划分成若干个彼此相通的矩形区域,每个矩形区域中存在唯一的基点。根据基点信息来识别矩形区域,矩形区域间存在交错网络。基点作为交错网络的节点,基点间的“连通”线段作为交错网络的边线。在交错网络上实现搜索环境所有基点的全局路径规划,在矩形区域实现局部遍历。通过对每个局部区间得遍历实现对整个环境的完全遍历。该环境建模方法综合了栅格法和拓扑法的优点,其对环境分割的思想来源于栅格法;其交错网络建模思想来源于拓扑法。基点类似于节点,交错网络类似于拓扑网络。但该建模方法中的基点和拓扑网络中的节点、交错网络和拓扑网络有着本质的区别,所以建模方法是不同的。针对完全遍历路径规划,矩形环境建模是可行的,而且是有效的。和栅格和拓扑法相比,该矩形环境建模有优势也有不足:

优点:该环境建模方法简单有效,能够对未知环境进行环境建模,特别适应于完全遍历路径规划的环境建模。信息存储量很小,克服了栅格法环境信息存储量大的困难,避免栅格法的全局定位;建立全局交错网络远比拓扑网络建立简单。针对移动机器人完全遍历问题,该环境建模方法是合理的、高效的,在下一章中通过在软件上仿真证明其有效性。

缺点:该方法中建立基点间的信息尤为重要,如果环境中某基点和相邻的八个基点都不相通,那么交错网络就会断开,不利于移动机器人导航。另外,通过相对坐标法对环境基点定位带来两方面问题。一是要求超声波传感器测量距离要足够远,由于超声波测量距离是有限的,这就限制了建模环境的大小,二是在相同的矩形区域内如果出现和基点相对位置坐标相同的“Look Alike”点,就会引入干扰。此外,该环境建模方法由于矩形区域有重叠,降低了移动机器人完全遍历的效率。所有的缺点问题都是可以通过引入其它算法加以改善和解决的,接下来针对矩形环境建模方法的缺点提出相应的解决办法。

#### 2.4.6 矩形环境建模若干问题研究

上节提到矩形环境建模存在的若干问题,在这节中对环境建模受超声波测距范围限制、“Look Alike”点存在、矩形区域重叠等若干问题逐一提出解决办法。

该环境建模方法和拓扑法在基点和节点的位置检测上有相同之处,都是采用超声波传感器进行相对位置检测。拓扑法中拓扑网络的建立是靠超声波传感器测距来实现的,测距过程中只关心当前点和障碍物的距离,用这种方法建立拓扑网络。由于障碍物的存在,基点的相对坐标是不同的,即使有的方向距离长度超出超声波测距范围,比如在图 2-7 中,标注为 99 的距离是超过超声波测距范围的。结合基点相对坐标信息和空间位置信息可以完成基点的定位和识别。这样,就解决了环境建模受限于传感器测距范围的难题。此外,本文主要讨论室内移动机器人的完全遍历问题。目前,超声波传感器测量的距离能达到 15 米,完全能够满足室内环境要求。

“Look Alike”点的存在影响基点识别,可以通过“基点回溯”方法解决此问题。所谓基点回溯方法就是通过网络中当前点和相邻某已知点之间路径信息,可以由当前点回到相邻某已知点。在交错网络中,由于基点间的连通关系,可以由当前基点回溯到相邻的已知基点。假设在图中 2-10 中的基点 7 所在的矩形区域存在和基点 7 具有相同相对位置坐标的“Look Alike”点 P。已知基点 7 和基点 8 相通,基点 7 与基点 8 之间的距离为 1,且已知基点 8 的相对位置坐标。“基点回溯”步骤:首先,在基点中找到所谓的“基点 X”,这点可能是基点 7 也可能是点 P;接着由该点出发向 H 方向移动距离 1;最后,测量当前位置的相对位置坐标,判断该点是否是基点 8,如果是,则点 X 就是基点 7,否则点 X 就不是基点 7。

矩形覆盖问题是不可避免的,不过可以通过确定合适的正方形边长大小尽量减少覆盖面积。在环境建模中正方形边长大小的选取特重要,由以下几个因素决定:首先,取决于环境的形状、尺寸,合适的尺寸能够完整划分环境空间,特别是不规则环境;其次,取决于环境中障碍物的尺寸,合理的尺寸可以减少矩形覆盖面积。

另外,由于环境的复杂可能会出现某基点不在交错网络上,即出现某基点与周围的八个相邻基点都不同情况。这种不在交错网络上的基点如何来寻找?首先,要寻找到其相邻基点,判断它们空间位置关系;接着,沿障碍物避障。这个过程前后车体应在同一条直线上,便于搜索基点。

## 2.5 本章小结

环境建模是移动机器人路径规划的基础,是移动机器人研究中的热点问题。为了解决在未知环境中完全遍历路径规划问题,全局建立导航路径并在局部实现区域遍历是一种可行的办法。本章从分析栅格法,几何(特征)法和拓扑法等常见环境建模法入手,综合几种方法的优点提出了一种基于栅格法、拓扑法的新的环境建模方法——矩形分解法。文中针对该方法又提出表示环境的“电子地图”。接着,将该环境建模方法与栅格法和拓扑法进行比较,指出其优缺点。最后,针对该建模方法存在的一些问题提出了具体的解决办法。矩形环境建模方法非常适合完全遍历路径规划,而且方法简单,代价低。在后续章节中,我们讨论基于矩形环境建模法的完全遍历问题。



## 第三章 基于矩形分解法的移动机器人完全遍历算法研究

随着机器人的应用越来越广泛,人们对机器人的智能的要求不断提高,其中一个最基本的需求就是实现路径规划。路径规划是机器人研究领域中的一个关键问题之一,主要指机器人如何有效地利用环境信息,规划出一条适当的避障运动路径。它是机器人执行各种任务的基础,反映了机器人在运动过程中与周围环境的交互能力,路径规划是移动机器人完成任务的保障。

### 3.1 路径规划核心问题

路径规划的问题描述是:在一个存在各种障碍物的空间中,对于任意给定的起始点和目标点,要求找出一条从起始点出发到目标点的路径(如果有的话),这条路径必须绕过所有的障碍物,并且这是一条最优路径(譬如路径最短)。移动机器人路径规划主要完成的任务是:

- (1) 在环境的途中寻找一条路径,保证移动机器人沿该路径移动时不与外界碰撞;
- (2) 利用自身的环境感知系统能够识别和处理环境建模中的不确定因素和路径执行中出现的误差;
- (3) 移动机器人能够自主避开外界干扰物体而使其对自身环境感知系统的影响降到最小;
- (4) 能够按照需要找到最优路径。路径规划问题在理论上主要存在着两个子问题:环境表示和路径搜索。

#### 3.1.1 环境表示

环境表示即环境建模,包括环境中障碍物的表示、目标的表示和自由空间的表示。合理的环境建模有利于规划中搜索量的减少,有利于时空开销的减少。

环境建模是路径规划的第一步,可以说,环境建模方法直接决定了路径规划策略、效率。任何一种规划算法都与某种特定的环境建模技术相对应的。环境模型有静态确定模型和动态时变环境模型。目前大多数研究工作集中于静态路径规划,但动态路径规划问题已引起人们的注意。对于静态已知的环境,已有不少成功的研究成果,其建模技术也是相对较为成功的。另一方面,部分已知或完全未知环境的路径规划问题没有得到完善的解决,其根本原因在于难以建立有效的环境模型。

#### 3.1.2 路径搜索

在某个指定区域中,确定机器人从起始位置移动到目标位置的安全路径,使得移动过程中不发生机器人与障碍物的碰撞,一系列安全位置就可以构成安全路径。解决路径规划问题的关键在于设计一种恰当的环境模型表示方法,即一种数据结构,该结构能反映出机器人在某个位置上发生碰撞的可能性。然后,按照模型中的连通性构造与之对应的连通图。该连通图抽取了环境模型的连通性,忽略与路径规划不相干的信息,避免了因无关信息的引入使规划复杂化。这种连通图构成了问题状态空间,在该状态空间内利用搜索技术进行搜索,便可解出一条通路。将通路上的节点转化为实际模型中的表示形式,便可得到机器人的无碰路径。

### 3.2 路径规划的分类

路径规划的分类方式随着标准的不同有很多分类方法。按移动目标主要有两种路径规划，一种是传统的点到点的路径规划，另一种就是完全遍历路径规划。点到点的路径规划是一种从始点到终点的运动策略，它要求寻找一条从始点到终点的最优（如代价最小、路径最短、时间最少）并且合理的路径，使移动机器人能够在工作空间顺利地通行而不碰到任何障碍物。完全遍历路径规划是一种在二维工作空间中特殊的路径规划，指在满足某种性能指标最优或准优的前提下，寻找一条在设定区域内从始点到终点且经过所有可达点的连续路径。图3-1(a)为传统的点到点的路径规划，此路径是一条从起点S到终点G的最短的避碰的路径。(b)为完全遍历路径规划，此路径是一条遍历环境空间中所有可达点的路径。

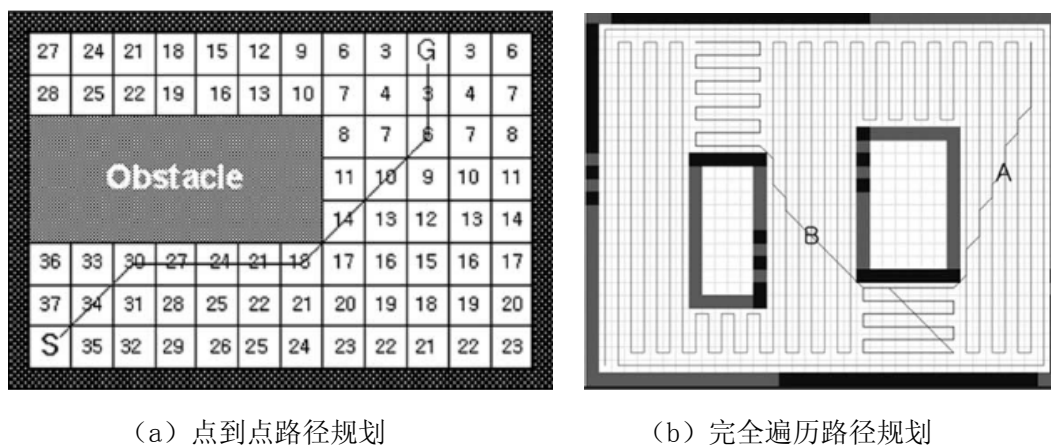


图3-1 传统路径规划和完全遍历路径规划比较

根据对环境信息掌握的程度和空间描述形式将机器人路径规划分成三类：基于环境先验完全信息的全局路径规划、基于传感器信息的局部路径规划和混合型方法。全局规划方法依照已获取的环境信息，给机器人规划出一条运动路径。全局路径的精确度取决于获取环境信息的准确程度。全局方法通常以寻找最优解，但需要预先知道环境准确的信息，并且计算量通常很大。局部规划方法侧重考虑机器人当前局部环境信息，通过多种传感器获取位置或部分未知的环境信息，即障碍物的尺寸、形状和位置等信息，使机器人具有良好的避碰能力。和全局规划方法相比，更具实时性和实用性。缺陷是仅依靠局部信息，有时会产生局部极点，无法保证机器人能顺利地到达目标点。混合型方法结合全局和局部方法的优点，将全局规划的“粗”路径作为局部规划的子目标，特别在复杂环境中此方法经常被使用。总的来说，全局路径规划基于环境模型，环境的全部信息已知；局部路径规划基于传感器的信息，环境信息全部未知或部分未知。局部路径规划和全局路径规划并没有本质区别。前者只是把全局路径规划的环境考虑得更复杂一些，即环境是动态的。很多适用于全局路径规划的方法经过改进都可以用于局部路径规划；而适用于局部路径规划的方法都可以适用于全局路径规划。

### 3.3 几种典型路径规划

移动机器人路径规划研究起始于20世纪70年代，目前对这一问题的研究仍十分活跃，许多学者做了大量的工作，提出了许多成熟的路径规划算法。根据空间描述形式的不同，从全局路径规划和局部路径规划来划分国内外路径规划方法较为清晰。全局的路径规划有基于构型空间的几何法和基于状态空间的拓扑法，前者主要有单元分解法（栅格法）、可视图法、

自由空间法等,后者主要是拓扑法。在前一章中,我们介绍了几种常见的环境建模法:栅格法<sup>[19, 23, 24]</sup>、拓扑法<sup>[25, 26, 27]</sup>、几何法、可视图法<sup>[51]</sup>和自由空间法等。实际上,这些环境建模的方法加上简单的搜索算法就构成了全局路径规划算法,在此再作介绍。常用的局部路径规划方法有人工势场法<sup>[11-22]</sup>、遗传算法<sup>[33-35]</sup>、模糊逻辑算法<sup>[40]</sup>、神经网络法<sup>[39]</sup>和其他混合方法等,其中以人工势场法最成熟,用得最多。

### 3.3.1 人工势场法

人工势场法是移动机器人导航中提出的一种虚拟力法,其基本思想是将机器人在环境中的运动视为在一种虚拟的人工受力场中的运动,是对机器人运动环境的一种抽象描述,机器人在受力场中具有一定的抽象势能,势场中包括斥力极和引力极。不希望机器人进入的区域和障碍物属于斥力极,目标及机器人系统建议通过的区域为引力极。在引力极和斥力极的周围由一定的算法产生相应的势场,任何一点的势场为引力极和斥力极在该点产生的势场之和。移动机器人在势场中具有一定的抽象势能,其负梯度称为势力。势场的建立主要用于局部动态避障,此时的引力极是局部环境中的中间目标,斥力极则是局部环境中的障碍物。引力和斥力的合力作为机器人的加速力,来控制机器人的运动方向和计算机器人的位置。该方法结构简单,便于局部规划低层的实时控制,在实时避障和平滑的轨迹控制方面,得到了广泛的应用。但对存在的局部最优解的问题,容易产生死锁现象,因而可能使机器人在到达目标点之前就停留在局部最优点。

人工势场法应用于路径规划是由Khatib首先提出的,不过Khatib人工势场法存在局部极小值问题,应用时通常存在几个缺陷<sup>[67]</sup>: (1)在相近障碍物间不能发现路径; (2)在狭窄通道中摆动; (3)在障碍物前振荡; (4)存在陷阱区域; (5)当目标附近有障碍物时无法达到目标点(goals nonreachable with obstacles nearby, GNRON)。近几年来对势场法进行路径规划的研究大多是集中在如何解决上述的几个缺陷问题上的,也取得了相当的进展,但一般都是针对较简单或单一的路径环境进行研究<sup>[24, 21, 22]</sup>,文献[22]建立一个新的斥力场函数,这个斥力场函数把机器人与目标点之间的相对距离也考虑进去,从而确保整个势场在目标点全局最小。

### 3.3.2 遗传算法

遗传算法运用于移动机器人路径规划的研究近来取得了许多成果<sup>[74-76]</sup>,其基本思想:将路径个体表达为路径中一系列中途点,并转换为二进制串。首先初始化路径群体,然后进行遗传操作,如选择、交叉、复制、变异。经过若干代进化以后,停止进化,输出当前最优个体。

多数优化算法都是单点搜索,易于陷入局部最优,而遗传算法却是一种多点搜索算法,故更有可能搜索到全局最优解。遗传算法的整体搜索策略和优化计算不依赖于梯度信息,解决了一些其它优化算法无法解决的问题。遗传算法运算速度不快,进化众多的规划要占据较大存储空间和运算时间,优点是克服了势场法的局部极小值问题,计算量不大,易做到边规划边跟踪,适用于时变未知环境的路径规划,实时性较好。

### 3.3.3 模糊逻辑算法

模糊逻辑算法<sup>[2][71-73]</sup>基于对驾驶员的工作过程观察研究得出。驾驶员避碰动作并非对环

境信息精确计算完成的,而是根据模糊的环境信息,通过查表得到规划出的信息,完成局部路径规划。优点是克服了势场法易产生的局部极小问题,对处理未知环境下的路径规划问题显示出很大优越性,对于解决用通常的定量方法来说是很复杂的问题或当外界只能提供近似的、不确定信息数据时非常有效。

此外,局部路径规划方法还有神经网络法和其他一些混合算法。以上介绍了局部路径规划的一些方法,显然这些方法就是路径搜索的方法。在栅格法中结合人工势场法就变成了全局路径规划,可视图法中完全可以使用遗传算法解决全局路径规划问题。在移动机器人路径规划中往往结合几种路径规划方法,如Choset结合了精确单元分解法和模板模型法<sup>[77]</sup>,将遗传算法和栅格法相结合<sup>[78]</sup>,文献[79]探讨了基于模糊神经网络理论的实时局部路径规划问题。全局路径规划和局部路径规划没有本质上的区别。传统的点对点路径规划和完全遍历的路径规划是有很大的区别的,相比点对点路径规划,完全遍历路径规划要求更高,算法更复杂,下面主要讨论完全遍历路径规划问题。

### 3.4 完全遍历规划描述

完全遍历路径规划是一种特殊的路径规划方法,研究完全遍历路径规划有很大的实用价值和经济效益。但是到目前为止,完全遍历路径规划的研究还处于起步阶段。遍历路径规划应用的环境模型简单化,其中的障碍物都是规则形状的,而且路径规划的智能性低,还没有形成一个比较全面、权威的性能指标,对于动态未知环境中的遍历路径规划,还没有很好的解决。本文在分析和综合了国内外完全遍历路径规划的研究工作,借鉴其中的优点,立足弥补其中的不足,系统地研究了移动机器人的遍历路径规划并提出基于矩形分解法的完全遍历算法。

#### 3.4.1 遍历规划数学描述

设  $S = \{x, y \mid x, y \text{ 为某闭合曲线所包围的点, 即机器人运动的整个范围}\}$ 。

定义1: 可达区域  $S_{\Omega} = \{x, y \mid ocup(x, y) = 0\} \subseteq S$ , 其中  $ocup(x, y)$  为占有函数。

$$ocup(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{无障碍} \\ 1, & \text{有障碍} \end{cases}$$

定义2: 不可达区域  $S_{\Delta} = \{x, y \mid ocup(x, y) = 1\} \subseteq S$ , 显然  $S_{\Omega} \cap S_{\Delta} = \emptyset$ , 且  $S_{\Omega} \cup S_{\Delta} = S$ 。

如果将平面移动机器人等效为质点,那么遍历就是该质点能够连续移动且经过  $S_{\Omega}$  中所有点的一条连续路径,称该路径为可行遍历轨迹。显然,可行遍历轨迹不止一条。所有可行遍历轨迹称为可行遍历轨迹丛,由下式表示:

$$L_{\Sigma} = \left\{ l_i(x, y, x_s, y_s, x_g, y_g) \right\} \quad (i = 1, 2 \dots n)$$

其中 $(x_s, y_s), (x_g, y_g)$ 表示机器人起点和终点坐标值,  $(x, y), (x_s, y_s), (x_g, y_g) \subseteq S$ 。

### 3.4.2 完全遍历规划的性能指标

移动机器人的完全遍历路径规划常用的性能评价指标有遍历面积百分率, 遍历重叠率。

用 $S$ 表示移动机器人的整个工作空间, 用 $S_\Omega$ 表示可达区域,  $S_{hc}$ 表示已遍历的面积,  $S_{cc}$ 表示重复遍历面积。

1) 遍历覆盖率, 是指机器人沿可行轨迹线遍历完成后, 已遍历面积与可达区域面积的百分比。

$$J_{hc} = S_{hc} / S_\Omega \quad (3.1)$$

2) 遍历重叠率, 指所有遍历重叠面积之和与可达区域面积的之比的百分数。

$$J_{cc} = S_{cc} / S_\Omega \quad (3.2)$$

为了保证相邻区域之间不留有遍历盲区, 相邻遍历区域必须有一定程度的重叠, 显然, 重叠区域越小越好, 但因受机器人本身的系统误差, 定位误差, 控制精度以及环境状态的影响, 重叠区不可能太小, 如果一个机器人性能越高, 则遍历重叠率能控制在很小的范围内。从遍历重叠率, 还可以推出未遍历面积百分率, 它指机器人沿着可行轨迹线遍历完成后, 未遍历面积与可达面积的百分比。

$$J_{uc} = 1 - J_{hc} \quad (3.3)$$

如果一个机器人性能越高, 则遍历覆盖率越高, 遍历重叠率越低, 遍历效果越好, 本文中主要结合遍历重叠率和未遍历面积来综合评价完全遍历路径规划。

## 3.5 几种典型完全遍历路径规划

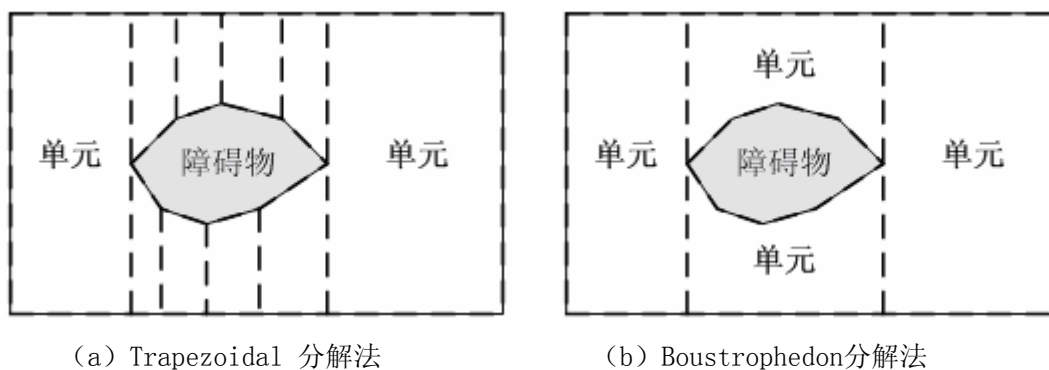
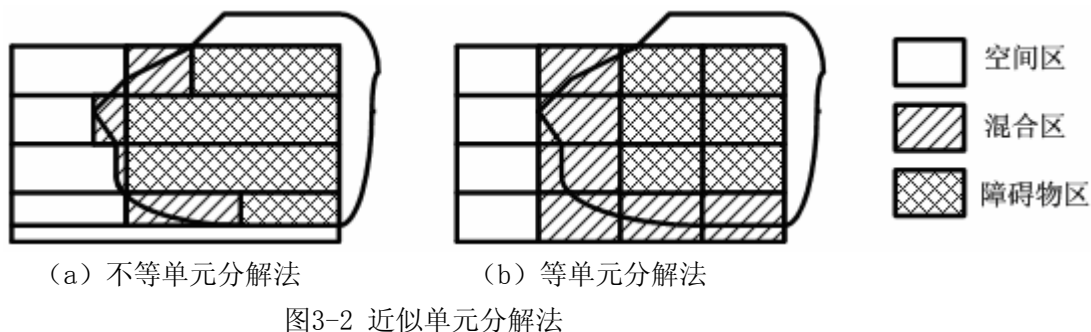
随着商用和家用清洁机器人产业化进程的推进, 完全遍历算法越来越受关注和研究。同时, 出现了许多成熟的方法, 最常用的方法有: 单元分解法<sup>[48, 49, 50]</sup>(Cellular Decomposition), 模板模型法<sup>[38]</sup>(Template Based Model), 神经网络<sup>[39]</sup>(Neural Network), 基于行为的路径规划<sup>[9]</sup>(Behaviours Based Approach)。其中, 单元分解法和模板模型法用得最多。

### 3.5.1 单元分解法

单元分解法是将环境根据障碍物的形状和分布情况分解为多个单元, 而后在此基础上实现遍历算法。在设计出对单元区域进行局部遍历的基础上, 完全遍历规划简化为对各个单元区域进行依次遍历问题。

单元分解法按单元划分的精确度分为: 近似单元分解法<sup>[36]</sup>(Approximate Cellular Decomposition), 精确单元分解法<sup>[37]</sup>(Exact Cellular Decomposition)。近似单元分解法是将整个环境空间划分为障碍物区、空间区和混合区。根据划分单元的大小又分为等单元分解和不等单元分解, 如图3-2所示。目前, 有两种主要的精确单元分解算法: Trapezoidal单元分解算法<sup>[11]</sup>和Boustrophedon单元分解算法<sup>[47]</sup>。Trapezoidal算法将环境分解为梯形单元,

在单个单元区域中机器人通过往返移动来进行遍历,如图3-3(a)所示。Boustrophedon算法是Trapezoidal算法的改进,其目的是减少由于单元分解过多而造成的重复遍历,如图3-3(b)所示。值得注意的是,Boustrophedon算法之减少了机器人在相邻单元之间移动时所产生的重复遍历,机器人在不相邻单元之间移动时所产生的重复遍历并没有减少。Choset详细介绍了机器人在不同分块间移动的算法<sup>[48]</sup>。Garcia E、Gonzalez P对Choset算法进行补充,并详细介绍了在未知环境下基于Boustrophedon单元分解法的完全遍历算法<sup>[50]</sup>。



### 3.5.2 模板模型法

模板模型根据先验知识,定义了几种典型模板。在路径规划时让事先定义的模板与环境匹配,整个路径就是由一系列的模板组成的。在这个方法中,为了简化路径规划过程,环境事先扩大,机器人就可以考虑成一个质点。该算法首先见于参考文献[80],但该文章中提出的模板算法不能应用于有障碍的环境中。参考文献[38]中De Carvalho等提出了一种依靠二维环境的地图的完全遍历路径规划模板,定义了五种模板:前进模型(Towards Marker, TM)、沿边转向模型(Side Shift, SS)、回逆跟踪(Backtracker, BT)、U转弯模型(U-Turn, UT)、U转弯交替模型(U Turn Interlaced, UTI)。该算法对前面提出的模板算法进行改进,可以应用于基于地图的有障碍环境并且对环境中的未知障碍有相应处理策略。参考文献[36]进一步改进模板算法,定义了7种模板,如图3-4所示。由于模板数量多,适应于较为复杂的环境。

由于环境的复杂性,很难找到能适应任何环境的一组模板。这就大大限制的模板模型法在完全遍历路径规划中的应用,特别是在一些特殊情况比如遇到存在凹陷的障碍物时,机器人就会进入无法处理的死循环状态。这种情况出现的主要原因是由于对整个环境缺乏整体规划。此外,基于模板的模型完全遍历路径规划,它要求事先定义环境模型和模板的记忆,因此对于变化着的环境就不好处理了,比如在遍历过程中突然出现一个障碍等。

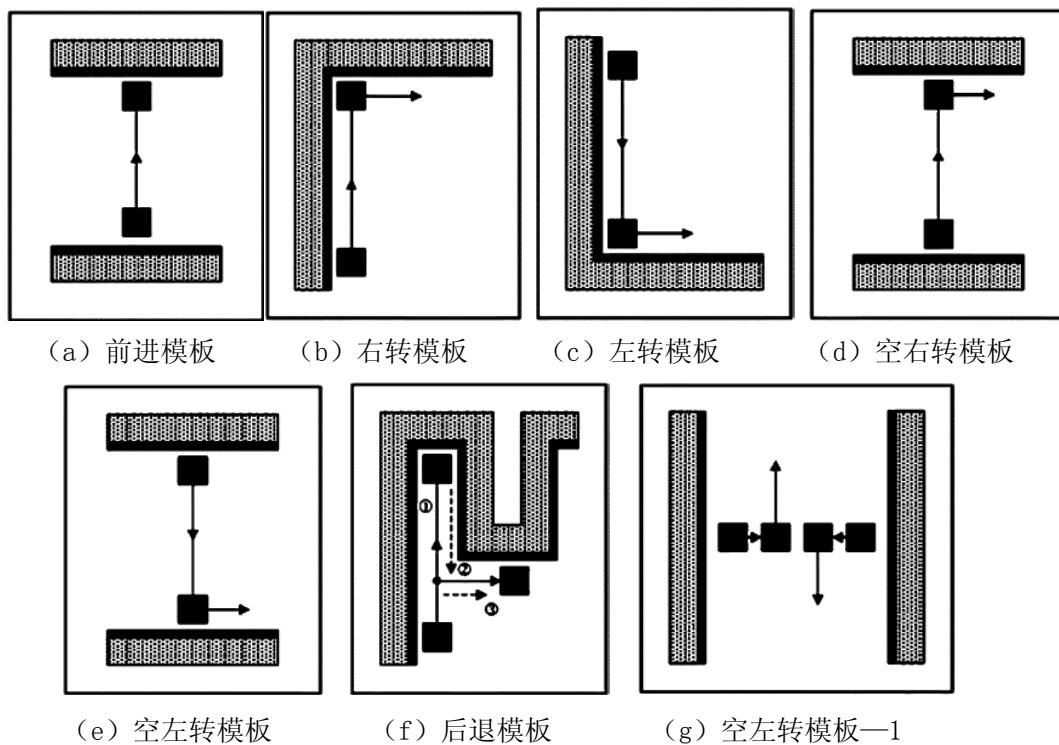


图3-4 完全遍历七种遍历模板

此外,神经网络法和基于行为的路径规划方法在移动机器人完全遍历路径规划中也得到了广泛应用。不论哪种完全遍历算法都有其局限和缺点,单元分解法环境建模比较复杂,而且很容易产生大量的重复遍历,模板模型法容易进入死循环。

### 3.6 基于矩形分解法的完全遍历算法

纵观各种遍历算法,它们往往适应于环境已知和环境部分已知的情况<sup>[80-83]</sup>,很难适应于未知的环境。在环境形状和大小,障碍物数量、位置和大小都未知的情况下,这些算法都很难适应。所以我们针对这种情况提出了一种基于矩形分解法的完全遍历算法。

### 3.6.1 基于矩形分解法的完全遍历算法思想

矩形环境建模方法实际上就是单元分解法的一种,利用单元分解法的思想将整个环境划分成若干个单元。不同于其它单元分解法,矩形环境建模建立了基点和交错网络等信息,且每个矩形单元对应唯一的基点。在交错网络上搜索基点,一旦每个基点都被搜索到,则每个矩形单元都被遍历,这样整个环境就被遍历了。因此,完全遍历问题转化为在矩形环境建模的交错网络上寻找一条路径来遍历所有基点。

基于矩形环境建模方法,从系统的观点出发,将完全遍历路径规划包括两个层次:全局路径规划层和局部路径规划层(如图3-5)。全局路径规划层作用在矩形环境建模的交错网络上,通过建立概率函数并事先确定的规则实现对交错网络上所有基点遍历。而局部路径规划层通过对周围环境的学习来确定合适的局部区域遍历的方法,进行局部遍历。全局路径规划在基点间进行,局部路径规划在矩形区域内进行。每一个局部路径规划要起于基点且终于基点,即局部遍历首先由该局部区域的基点开始,遍历完该局部区域后必须要回到该局部区域

的基点。全局路径规划和局部路径规划交错进行，最终完成环境完全遍历。

由前一章节的矩形环境建模方法可以实现在未知环境中的环境建模，在此基础上，我们建立全局路径规划和局部路径规划，进而解决在未知环境中的完全遍历问题。

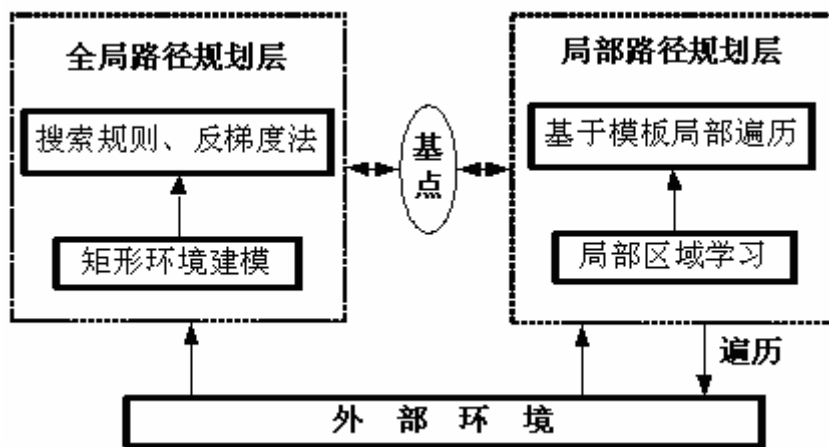


图3-5 完全遍历路径规划

### 3.6.2 全局路径规划

移动机器人运动主要有两种，单元间的运动（既基点间的运动）和局部区域遍历运动。全局路径规划就是找到一条遍历所有基点的路径，该路径是由基点间线段组成的。图3-7为矩形环境建模，全局遍历路径就在交错网络上。基点间的运动模式就是走直线，并且规定仅能在A、B...H八个方向上运动（如图3-6）。要完成交错网络上所有基点的遍历就必须建立相应的搜索策略，路径搜索方法主要有A\*算法、人工势场法、启发式搜索方法、遗传算法、神经网络法等。这些方法我们在前面也作了简单介绍，在此不作累述。不论是哪种搜索方法，其目的只有一个——基于已有的信息，在环境模型中找到下一位置，直到完成路径规划。针对我们提出的矩形环境建模方法，许多全局路径搜索方法都适应，如A\*算法、启发式搜索方法、遗传算法等。不过我们在此提出了一种新的路径搜索方法——基于方向优先级的搜索优先规则（以下简称搜索规则）的搜索方法，该方法针对我们提出矩形的环境建模进行全局路径规划更简单、更有效。全局路径规划包括两部分：搜索规则的路径规划和反向梯度法解决“死基点”问题。

#### (1) 搜索规则建立

搜索下一个目标基点首先要在当前基点周围8个方向（A、B、……、H方向）上的相邻未遍历矩形区域基点中寻找，然后在全局其它未遍历基点中寻找。搜索规则的目标就是在周围相邻基点中寻找下一个目标基点，如果在其周围不存在目标基点，这就是“死基点”问题，将在下一节讨论。

由前一章节矩形环境建模可知，相邻基点间的距离与基点间空间位置相关，而空间位置可由环境建模的电子地图中得到。所以，搜索规则实际上仅需要确定下一目标基点与当前基点的方向关系。下一相邻目标基点必须满足三个条件：（1）该基点和当前基点是相邻的；（2）该基点所在的区域未遍历；（3）该基点和当前基点间是相通的。能满足以上三个条件的基点往往不只一个，如何在众多基点中挑选其中的一个呢？这就是搜索规则要解决的问题。为此，我们事先规定八个方向的优先级，不同的方向具有不同的优先级。在图3-7中可以看出，基点1为遍历起始点，遍历整体趋势是由下往上；在遍历过程中，要尽量沿X、Y 轴



寻找基点,这样可以避免出现“遗漏区域”和“死基点区域”;此外,每个方向的优先级是不同的。基于以上原因,确立了遍历方向的优先级数值(如图3-8)。除了方向优先级,搜索规则还与相邻区域“是否遍历”,区域间“是否通路”有关。所以说,相邻区域遍历情况、相邻区域间通路情况和方向优先级是搜索规则的三个要素。

为此,我们建立一个求向每个方向基点搜索优先级的一维数组 $P[8]$ , $P_0$ 、 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ 、 $P_5$ 、 $P_6$ 、 $P_7$ 分别代表移动机器人移向分块区域A、B、C、D、E、F、G、H的优先级。一维数组 $C[8]$ 代表A、B、C、D、E、F、G、H方向相邻区域是否遍历,1代表“已遍历”,0代表“未遍历”。一维数组 $T[8]$ 代表A、B、C、D、E、F、G、H各个方向上的“通路”情况,值为1代表“通”,值为0代表“断”。 $L[8]$  ( $0.3 \leq L[i] \leq 1$ , ( $i=0, 1 \cdots 7$ ))一维数组代表优先级的大小。F方向优先级最高,即 $L[5]=1$ 。方向优先级由高到低顺序为:F、H、D、G、E、B、A、C,具体值如图3-8。那么:

$$P[i] = C[i] * T[i] * L[i] \quad (i = 0, 1 \cdots 7) \quad (3.4)$$

用公式3.4可求出向八个方向上的搜索优先级,同时可以求出搜索优先级最大的值和搜索优先级最大的方向。

$$P_{\max} = \text{MAX}(P_0, P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7) \quad (3.5)$$

$$\text{Dir} = i \quad (P_i = P_{\max} \text{ and } 0 \leq i \leq 7) \quad (3.6)$$

式3.6求出了搜索优先级最大方向Dir,在该方向上寻找下一目标基点,由该方向便可推算出移动的距离,进而找到下一目标基点。可见,所谓的搜索规则就是将搜索优先级最大的方向定为搜索方向。在搜索规则引导下不断地搜索基点,最终完成所有基点遍历。

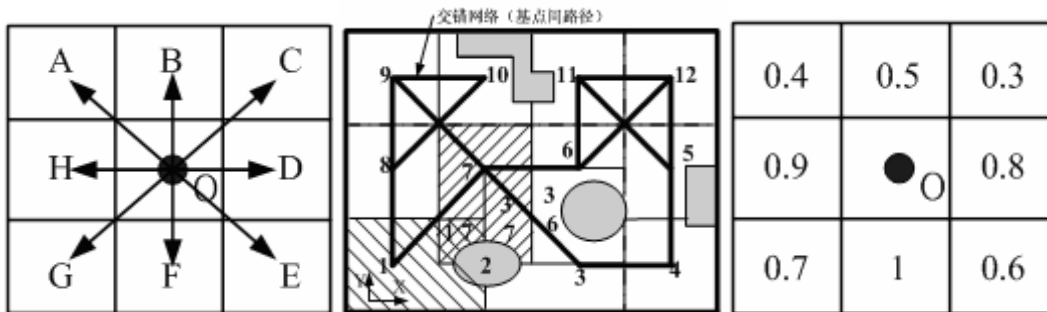


图3-6 基点间移动方向

图3-7 矩形环境建模图

图3-8 遍历方向优先级

## (2) 反向梯度法解决“死基点”问题

在使用搜索规则搜索下一目标基点时,可能会遇到“死基点”。所谓的“死基点”就是该基点周围的可通基点都已遍历,可环境中还有未遍历基点。为了达到完全遍历,必须要寻找一条通向最近的未遍历基点的路径。在矩形环境建模的交错网络上可以利用反向梯度法求得两基点间的最短路径。

反向梯度法是一种路径规划算法,其目的是求取最短路径<sup>[84][85]</sup>。这种算法将环境划分为一定数量的小格子并计算出每个小格子到达目标点的最短路径距离。目标点被标注一个为0的值,所有其它的小格子都被初始化为一个很大的值。算法从目标点开始并且遍历与其邻接的每一个状态,不断重复。一个 $P_i$ 邻接状态 $P_{i+1}$ 如果处在障碍物中,其值 $V(P_{i+1})$ 被设置为无穷大,否则, $V(P_{i+1}) = \min(V(P_i) + 1, V(P_{i+1}))$ 。在图3-9中,假设S点为“死点”,G点为最近的未遍历基点,按反向梯度法求得每个格子区域距离值。由S沿着距离值最小的路线行走,最终可以到达G点,而且这样的路径是两点间的最短路径。

在完全遍历过程中，常常遇到“死基点”情况，首先，通过环境电子地图找到最近的未遍历区域。通过寻找具体方法是：首先，查找遍历矩阵搜索未遍历矩形区域；接着，计算当前区域到所有未遍历区域的距离（空间距离），找到最近的未遍历区域，作为下一目标区域；最后，利用反向梯度法找到最近未遍历区域的路径。如图3-10所示，从基点1区域开始遍历，依次遍历了基点2、4、5、6、7、8、9基点所在矩形区域。遍历完基点9所在的区域后，用搜索规则找下一目标基点时发现基点9为“死基点”；接着，就在未遍历区域（基点12、13所在区域）中寻找最近的未遍历区域，经过计算，基点12距离基点9最近，即基点12就是下一目标基点。于是，就用反向梯度法求得基点9到基点12的最短路径（基点9 — 基点8（10） — 基点7（11） — 基点12）。

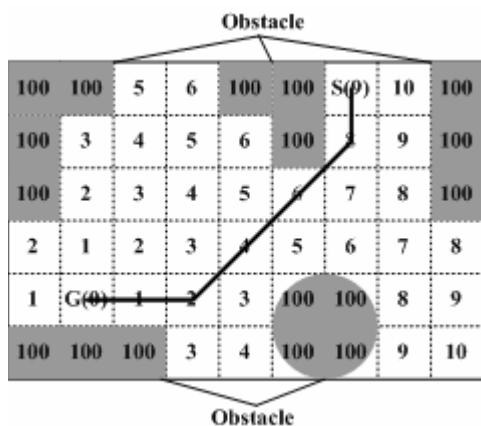


图3-9 反向梯度法求最短路径

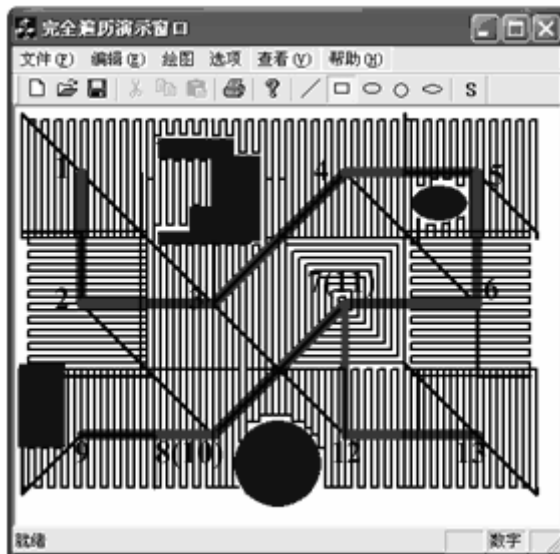


图3-10 完全遍历中的反向梯度法

### 3.6.3 局部路径规划

全局路径规划完成所有基点的遍历，而局部路径规划要完成某基点所在区域的局部遍历。在全局路径规划层每搜索到一未遍历基点，就要完成该矩形区域的局部遍历。全局路径规划和局部路径规划交错进行，最终实现环境完全遍历。在局部路径规划中，移动机器人完成局部区域遍历运动。这个过程分为三个部分：寻找局部区域遍历起始点，局部区域遍历和回到局部区域基点。

#### (1) 局部遍历模式

在全局路径规划中，采用单元分解法的思想，在单元间建立交错網路。在交错网络上实现对基点的遍历。在局部层要完成对局部矩形区域的遍历，由于局部区域是连通的，很容易使用模板法实现遍历。算法规定局部遍历路径规划三种基本遍历运动模式（如图3-11）：螺旋式，弓形式（横）和弓形式（竖）。遍历运动模式由环境的形状决定，而环境的形状通过环境学习得到。前一种模式针对矩形区域中没有障碍物的情况，后两种模式适应于矩形区域中存在障碍物的情况。弓形式（横）和弓形式（竖）其实是同一种遍历模式，只是遍历直线行走的方向不同，前者是横着行走，后者是竖着行走。这三种基本的遍历模式由5个基本模板组成，如图3-12所示，算法中定义了5种基本模板：（a）前进模板，（b）右转模板，（c）左转模板，（d）后退右转模板，（e）后退左转模板。

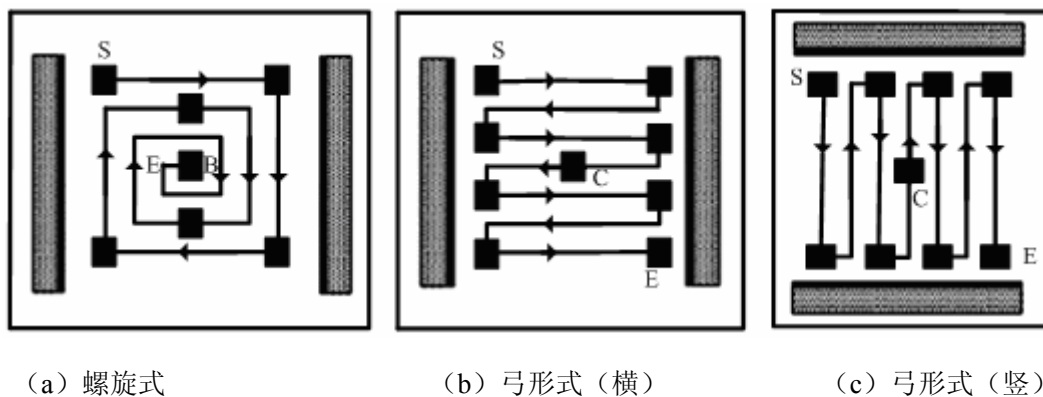


图3-11 局部区域遍历三种趋式

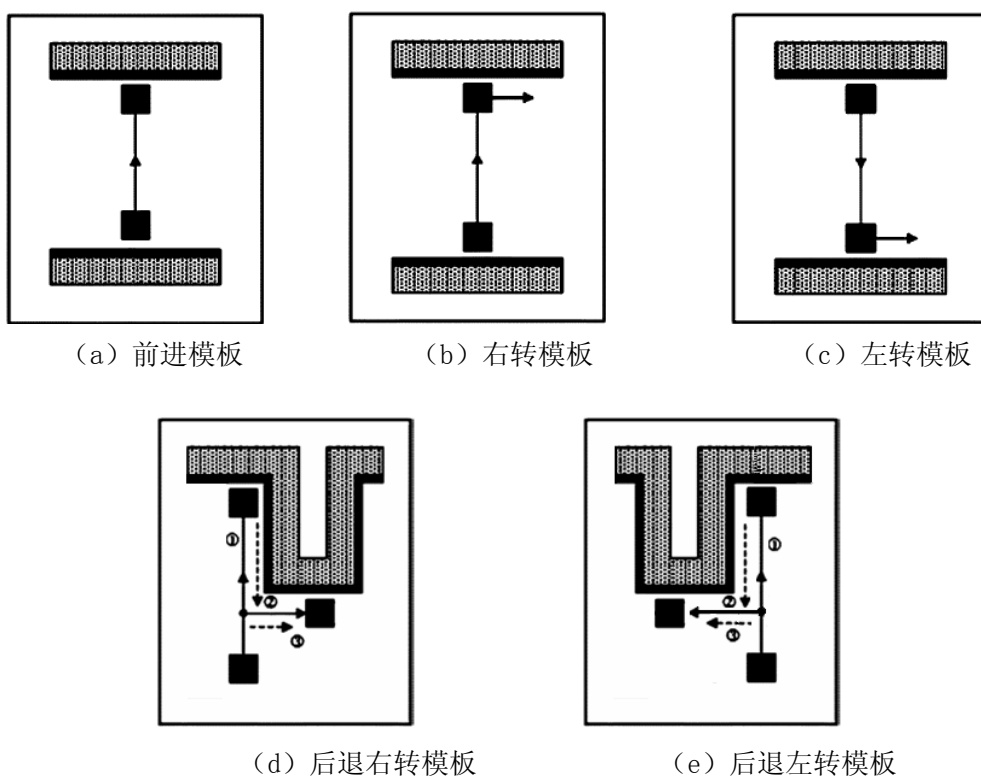


图3-12 局部区域5种遍历模板

## (2) 局部区域学习

局部区域学习是局部遍历的前提条件和保证,也是全局路径规划的基础。所谓局部区域学习就是移动机器人处在未遍历区域基点位置,调整好自身方位(面向地磁场N方向)后,通过自身环境感知系统,确定当前环境的大小、形状及于周围相邻区域的“通路”情况。环境的学习是环境矩形建模中必不可少的步骤,在对环境学习后要及时更新环境电子地图。对已知的局部环境就不必进行环境学习。

除了建立和更新环境电子地图外，局部区域学习还可以确定局部区域遍历的模式。对环境学习后，确定矩形区域的形状。这个过程就是环境正方形建模后矩形化的过程，参照前一章矩形环境建模。如果矩形区域不是正方形，将环境学习得到的形状与图3-13中的四种环境模式比较，找到合适的模式匹配图。如果矩形区域形状与（a）、（c）匹配，则采用弓形式（横）；如果矩形区域形状与（b）、（d）匹配，则采用弓形式（横）。如果矩形区域为正

方形，即该矩形区域中的基点和B、D、F、H方向的基点都相通，则区域采用螺旋式；模式匹配的目的是为了选择有效的遍历模式，可以一次性地遍历局部区域。同时，也是为了更好的选择局部遍历的起始点。

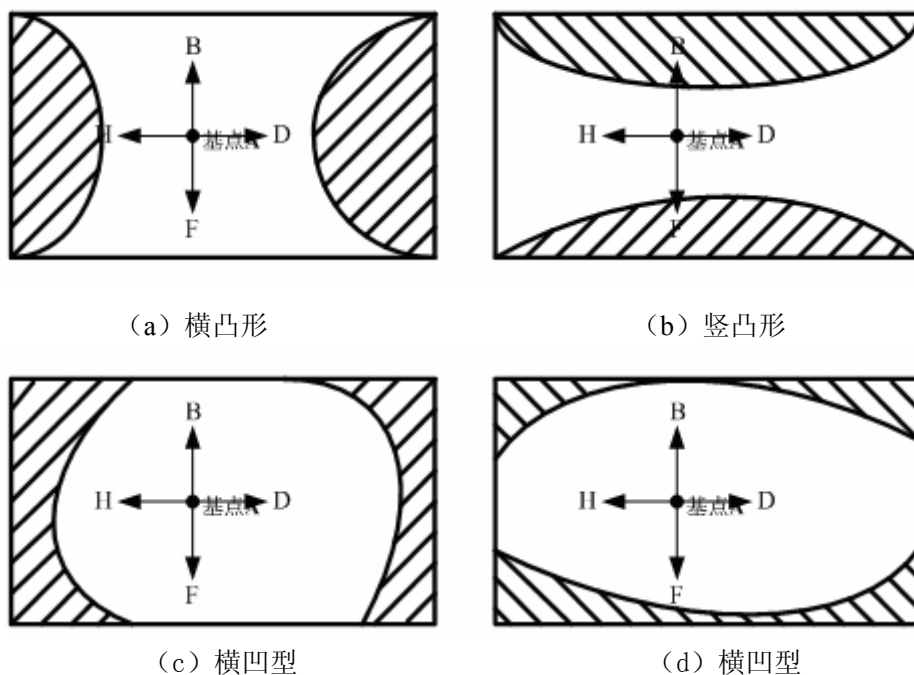


图3-13 矩形环境形状匹配模式

### (3) 选择起始点

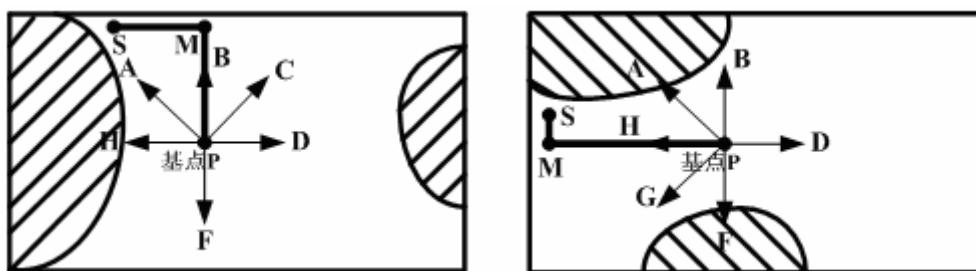
由以上确定局部遍历模式方法可知，选择螺旋式遍历模式的矩形区域是边长为SideLong的正方形，且该区域内无任何障碍物。规定基点A方向的顶点为其起始点，在局部坐标系中（以局部基点为坐标的直角坐标系）很容易寻找起始点。

选择弓形式遍历的区域内肯定存在障碍物且要遍历的区域不规则。为了更好的遍历不同局部区域，我们采用弓形（横）和弓形（竖）两种遍历方法。很明显，采用弓形（横）方法遍历时，起始点在矩形区域B方向边界处且在最靠近矩形区域A方向的顶点。寻找起始点步骤：首先，查电子地图确定矩形区域上边界与基点间的距离Dhv\_edge1；接着，比较A、B、C三个方向上的距离在B方向上的投影距离值（见第二章矩形环境建模），找到距离投影值等于或大于Dhv\_edge1值的方向，按A、B、C优先顺序选取其中某一方向作为寻找起始点方向，沿该方向移动至矩形区域边界处；最后，沿H方向行走直到遇到障碍物或走到矩形区域H方向边界。弓形（竖）方法遍历时，起始点在矩形区域H方向边界处且在最靠近矩形区域A方向的顶点。寻找起始点方法和上面介绍的方法类似，在此不作累述。图3-14是采用弓形式遍历寻找起始点示意图。

### (4) 矩形区域内遍历

在寻找到起始点后，按照所选取的遍历的模式，选取合适的模板对局部区域遍历。以弓形式（竖）遍历模式的局部区域遍历为例，遍历是在B和F两个方向上进行。首先，从起始点S沿F方向前进（前进模板），直到达到矩形区域下边界处。如果在到达下边界前遇到障碍物就选取左转模板（左侧无障碍物），或者选取后退左转模板（左侧有障碍物）进行遍历。左转一小段距离后要继续左转，方向指向B方向。接着，沿B方向前进至上边界处。如果在到达上边界前遇到障碍物就选取右转模板（右侧无障碍物），或者选取后退右转模板（右侧有障碍物）进行遍历。右转一小段距离后要继续右转，方向指向F方向。这样，重复在F、B方向

遍历，直到到达矩形右边界，完成矩形区域内遍历。



(a) 弓形式（横）起始点

(b) 弓形式（竖）起始点

图 3-14 弓形式遍历起始点



(a) 弓形式（横）基点回归

(b) 弓形式（竖）基点回归

图 3-15 弓形式遍历基点回归

### (5) 基点回归

局部区域遍历完成后，必须要回到基点。采用螺旋式遍历矩形区域后，终止点位于基点处，根据相对位置坐标信息只要微调位置即可回到基点。而采用弓形式遍历矩形区域后，终止点往往距离基点很远，需要有合适的算法搜索终止点到基点的路径。在上一小节中我们讨论了寻找起始点的算法，将此方法稍作改动即可求出基点回归路径。在矩形坐标系中，用距离累加的方法来求取坐标。遍历由基点出发，遍历过程中不断更新当前坐标，直到得出终止点的坐标。由终止点坐标判断该点靠近基点那个方向，再由终点所在侧三个方向上的距离关系确定终点首先要移动的目标方向（基点的 C、D、E、F、G 方向），接着，沿目标方向的反方向移动至基点处。在图 3-15 (a)，终点 E 在基点的 F 方向那一侧。由 E 坐标可知其靠近基点的 G 方向，比较 E、F、G 三个方向的距离，F、E 方向上的投影值最大，显然终点 E 距离 F 方向更近，所以终点 E 首先要移到基点 F 方向上。移动到基点 F 方向后，沿着 F 方向的反方向移动便可回到基点。

在矩形坐标系中，点的坐标是距离累加得到的。累积误差使得坐标存在误差，从而基点回归出现误差。解决这类问题方法是在矩形环境建模时尽可能缩小矩形区域。同时，在前一章节中我们用相对坐标来定位基点，基点回归后，通过比较当前点（“假基点”）的相对坐标和基点的相对坐标来判断“假基点”和基点间的空间距离关系，通过微调便可回到基点。这样，基点回归的误差由超声波测距仪器的精度决定。除此以外，我们还可以通过“基点回溯”方法降低基点回归的误差（见第二章）。

### 3.6.4 基于矩形分解法的完全遍历算法总结

移动机器人路径规划是移动机器人研究瓶颈问题之一，之所以难是因为很难解决移动机器人全局定位问题。于是，我们将整个环境空间划分成若干子空间，每个子空间是连通的，



在子空间中建立直角坐标,实现定位是可行的。子空间之间用交错网络连接,搜索子空间是用线性搜索的方法。子空间在空间上呈阵列分布,我们通过子空间在空间上的位置和方向来搜索子空间。鉴于这种思想,我们提出了矩形环境建模方法。子空间是连通的,可以采用模板法方法进行遍历。于是产生了基于矩形分解法的完全遍历算法。

该算法将全局遍历难度划分成若干局部区域遍历的难度,遍历难度显然减小了。此算法无需精确的环境全局定位,算法简单,适应性强。局部区域内准确的基点回归是其难点之一。基点回归的准确度和局部遍历测距传感器的精度有关,要尽可能的提高传感器精度。同时,基点回归后一定要校对“假基点”和基点的相对坐标,进而准确地回到基点。此外,局部遍历模式难以匹配复杂的环境,要适当增加遍历模式以适应众多复杂环境。同时,针对复杂的环境可以在模板遍历的基础上引入人工势场法,更有效地进行局部区域遍历,这是以后将要研究的方向。

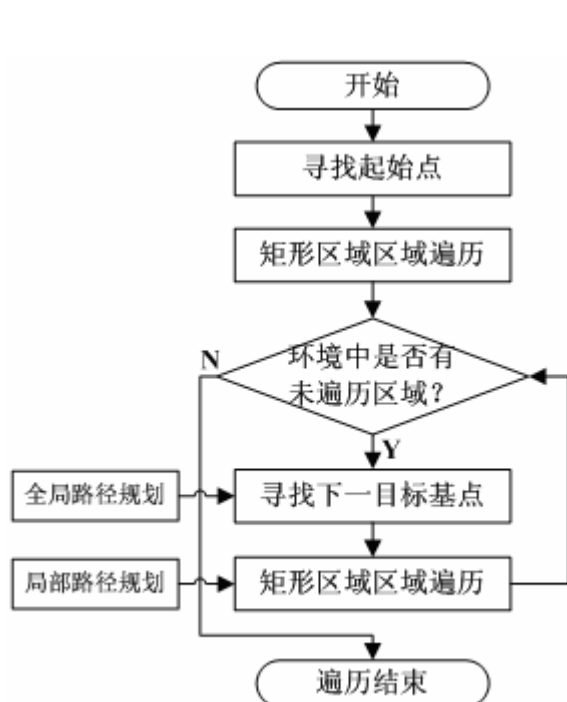


图3-16完全遍历流程图

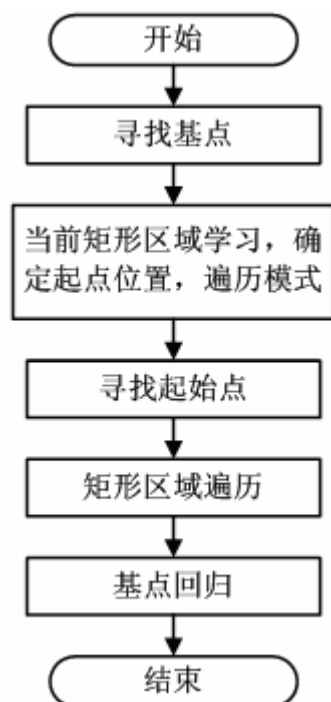


图3-17 局部遍历流程图

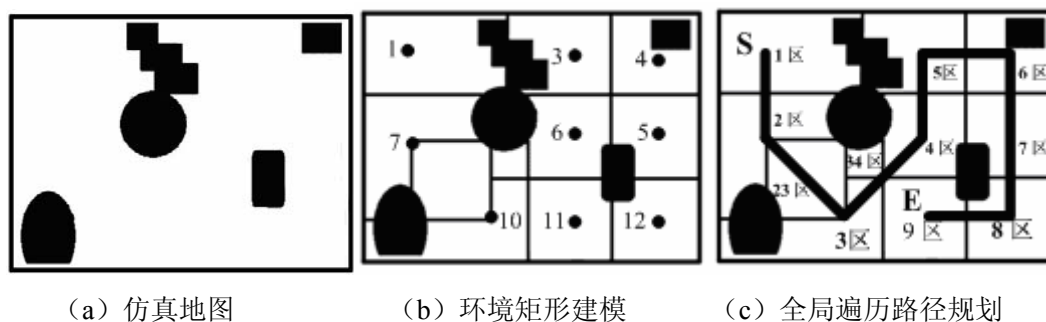


图3-18 环境建模及全局路径规划路径

### 3.6.5 完全遍历算法流程

在前一章中，我们研究了矩形环境建模，本章是在矩形建模的基础上完成完全遍历。环境建模和环境遍历是同时进行的，遍历同时进行环境探索和环境建模，局部环境建模后直接进行局部环境遍历。整个完全遍历流程框图如图 3-16 所示，局部区域遍历流程图如图 3-17 所示。

## 3.7 遍历算法仿真及分析

### 3.7.1 仿真结果

基于本章提出的完全遍历路径规划算法，进行了大量的仿真实验。下面是对图3-18 (a) 的仿真地图完全遍历结果。图3-18 (b) 是对图3-18 (a) 仿真地图矩形建模结果，全局路径规划如图3-18 (c) 所示。图3-19 (a-f) 分别表示各个局部矩形区域遍历结果。图3-20是完全遍历路径规划，图上的虚线代表全局路径规划。

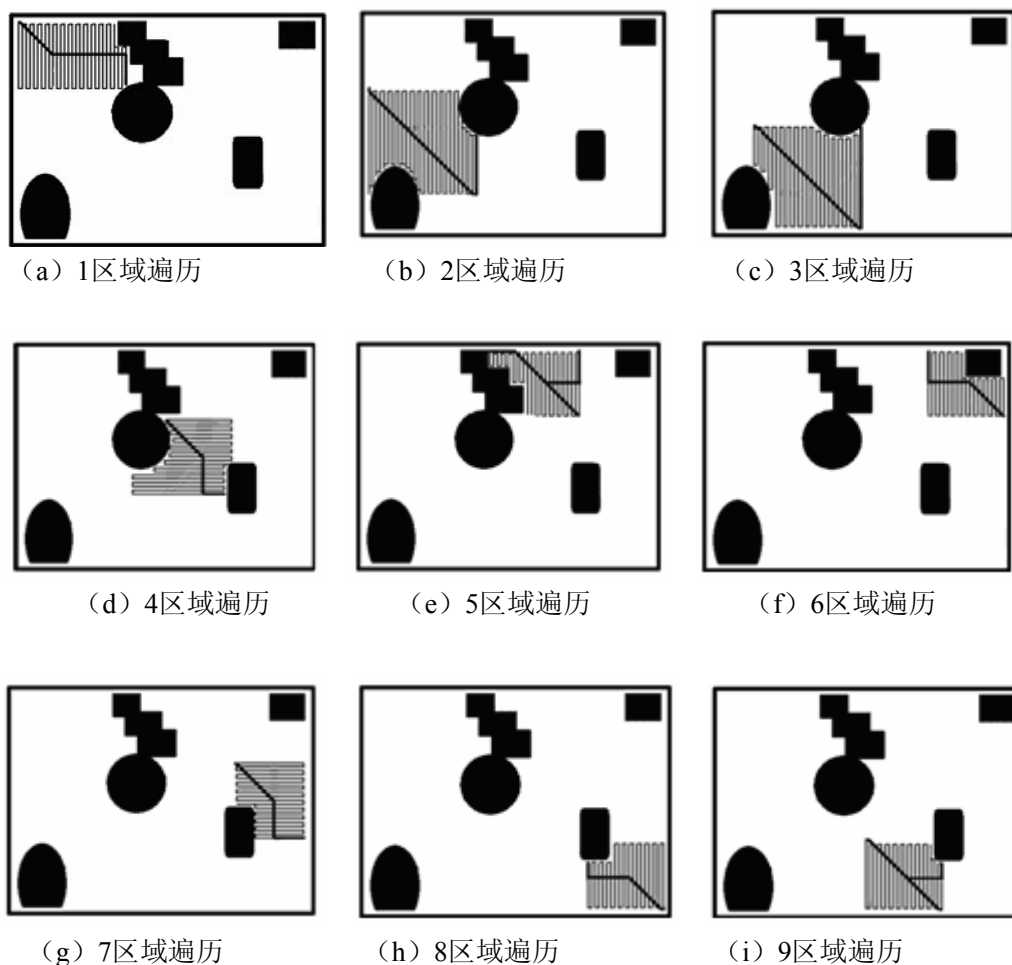


图3-19 各局部区域遍历仿真结果

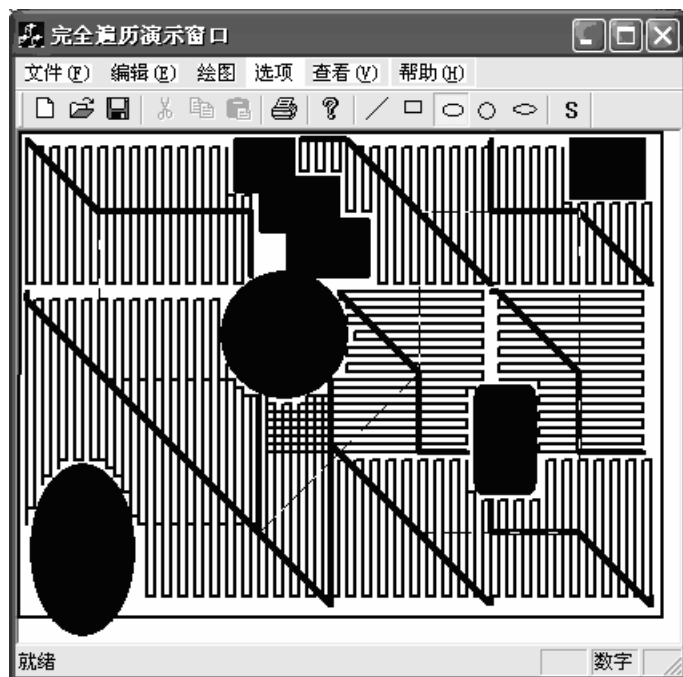


图3-20 完全遍历路径规划

### 3.7.2 仿真结论

经过大量地图的仿真表明，该遍历算法的覆盖率达到90%以上，有的甚至达到95%以上，而且重复率在10%以下。对于不同的地图覆盖率和重复率是不同的，不过对大多数地图而言，该算法是高效的、实用的，具有很强的适应性。由于算法只关注基点的信息，而基点是有限的，这样就大大减少了计算量。而完全遍历过程是机器人自主完成的，具有很高的智能。遍历过程中很少有遗漏区域，在障碍物附近区域仍有重复的情况，这是无法避免的。但这比以往的遍历算法有了大大的改善。对于特别复杂的环境该算法在局部区域的遍历算法有待进一步改进，同时如何更合理的进行矩形化建模将是下一步要研究的课题。

该完全遍历算法特点是系统要处理的信息量很少，机器人实时性控制更强。特别是提出了基点这一重要概念，使得在未知环境中实现完全遍历更有效、更方便。

## 3.8 本章小结

路径规划是移动机器人导航中最重要的任务之一。本章从路径规划研究内容、分类方法入手，分别讨论了几种常见的路径规划方法，如人工势场法，模糊逻辑法，遗传算法，神经网络法等。相对于点对点的路径规划方法，完全遍历路径规划是一个全新的概念。本章列举了常见的完全遍历方法，如单元分解法、模板法等。在单元分解法和模板法的基础上，基于矩形环境建模我们起出了一种新的完全遍历算法。全局路径规划层通过搜索规则来引导基点遍历路径，局部路径规划层采用模板法来遍历。最后，通过软件仿真来验证该完全遍历算法的有效性。



## 第四章 移动机器人的嵌入式环境感知系统

在移动机器人的研究中,环境感知(Environment Perception)一直是研究的热点问题之一<sup>[54][68-70]</sup>。所谓环境感知,实质就是移动机器人依靠在板(On-board)的传感器系统来获取环境信息,从而实现对环境的认识、理解和建模过程,它是机器人实现自推理和自适应的前提和保障。不同的传感器系统决定了环境感知方式和环境特征选取方式的不同。机器人环境感知能力的高低,主要取决于在板的传感器系统是否能快速、准确地获取周围环境的信息<sup>[62]</sup>。移动机器人环境感知的实现,一般是由多种类型相异、性能互补的传感器以及相应的信号处理系统完成。尽管在现有的移动机器人系统中,大多都使用了多个同类或不同类的传感器,但并没对这些传感器从整体上加以分析,更象一个多传感器的拼合系统<sup>[46][18]</sup>。因此,有必要从系统层次来对传感器系统加以阐述和认识。就某种意义而言,称机器人传感器系统为“环境感知系统”可能会更有理论和实际意义,这是对传感器系统的一个更科学和更深层次的定位。

### 4.1 移动机器人系统中的传感器技术

传感器是智能移动机器人系统的重要组成部分,其作用类似于人类的感知器官。机器人传感器就是通过模仿人的感觉器官,感知外部环境分布状况,为机器人系统决策提供必要的信息。一个复杂优良的智能系统应该具有多种传感器,为系统提供不同种类的数据和信息,如图4-1所示。

对于移动机器人而言,传感器的作用是实现环境感知和对自身状态的描述,为其提供推理决策的依据。根据功能特性的不同,可将机器人传感器分成两大类:内部传感器(Internal sensors)和外部传感器(External sensors)<sup>[41][42]</sup>。内部传感器(Internal sensors)主要用来检测机器人自身的状态信息,常作为反馈单元用于控制系统中。常用的内部传感器有:编码器、加速度计、陀螺仪等。其中,编码器通过检测编码脉冲信号来获取转轴的角位移,进而间接估计出机器人当前位置和方向信息,是移动机器人系统常用的一种内部传感器;加速度计能获取机器人线加速度信息,从而得到机器人当前运行速度和位置信息。虽然基于航位推测法能粗略估计出机器人位置和方位信息,但是由于误差累积,以及感知漂移等问题,因此还需要辅之以其它传感器来弥补航位推测法的不足。外部传感器(External sensors)主要用来探测机器人周围相关的环境信息,通常用于机器人环境感知、目标识别与跟踪以及安全作业等方面。外部传感器主要包括:视觉传感器、超声传感器、红外传感器等。视觉传感器常采用CCD图象传感器进行机器人的视觉导航与定位、目标识别和地图构建等。其主要局限性在于计算量大,对机器人系统的性能要求比较高,大多应用在要求比较高的场合;超声传感器主要用于检测环境中障碍物的距离信息和进行地图构造等;红外传感器主要用于探测环境中的近处障碍物分布信息,多用于机器人避碰、避障规划和环境自适应学习。

事实上,内外部传感器是根据传感器性能特点来划分的,两者并没明晰的界限。某些传感器在特定场合可作为内部传感器,也可作外部传感器<sup>[62]</sup>。移动机器人系统大都采用内、外部传感器互补协作方式,来实现对环境 and 自身状态的感知。考虑到人类80%的信息是来自于眼睛(相当于机器视觉),而机器人是模拟人类或替代人类来完成一定工作的。所以,也可将机器人传感器分成视觉类和非视觉类传感器两大类。随着应用领域不断扩展,机器人传感器的种类也将不断地增加,基于多传感器信息融合与集成的智能环境感知必然是发展趋势。

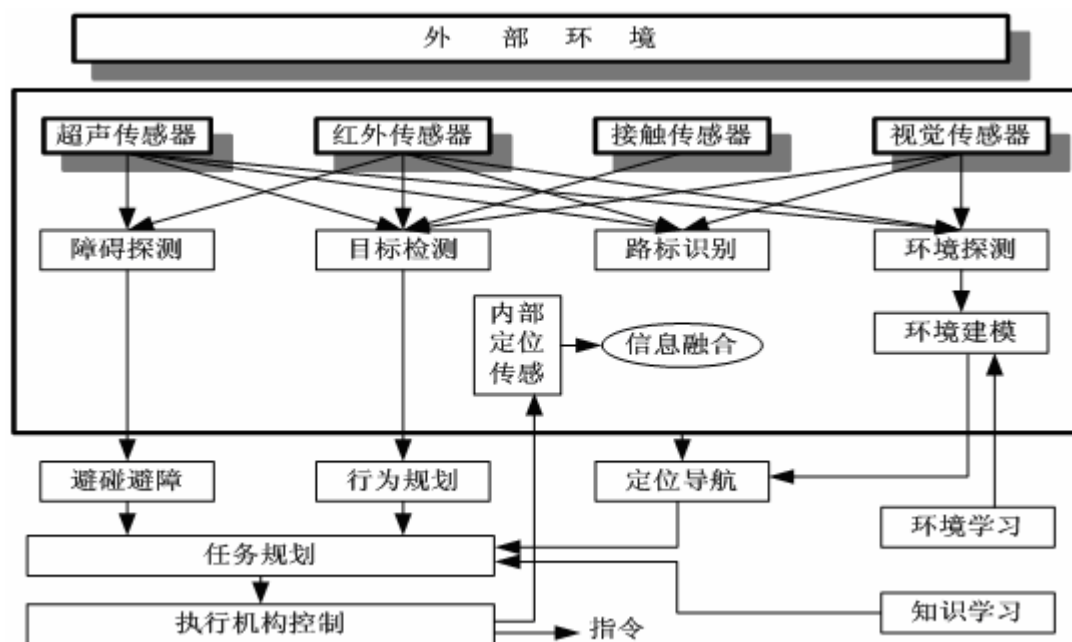


图4-1 多传感器在移动机器人系统中应用示意图

## 4.2 嵌入式环境感知系统

目前,我们已经成功地研制了嵌入式环境非视觉感知系统,并在智能环境感知研究方面取得一定成绩。考虑到移动机器人环境感知系统不仅要具有较完善的体系结构,而且还要具备适应环境变化的重配置功能。故而,无论从硬件还是软件上,都采用了模块化、标准化设计,便于系统的扩展和系统的维护。图4-2为环境感知系统功能框图。

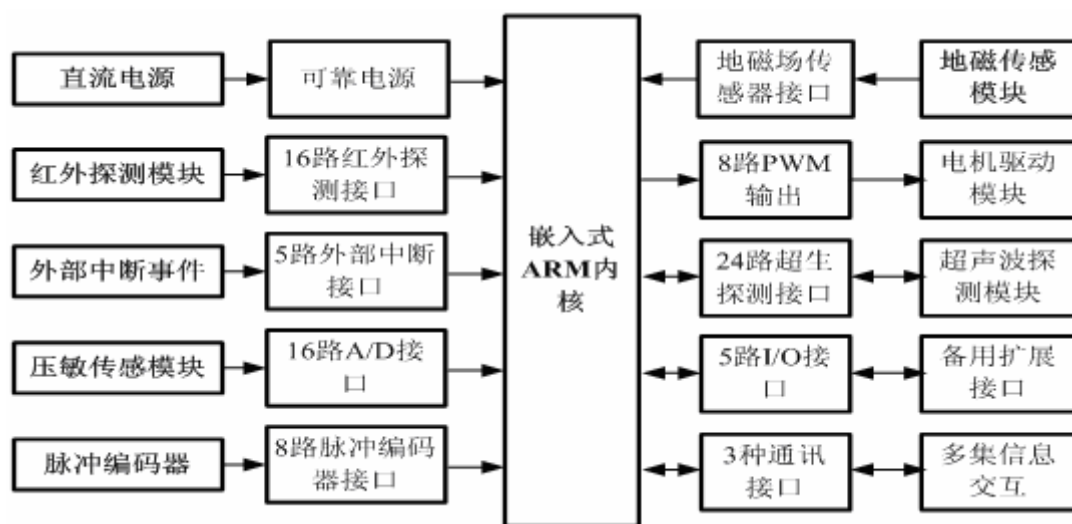


图4-2 嵌入式ARM环境感知系统功能框图

在该系统中,用于环境探测的模块主要有红外线探测模块、超声波探测模块、地磁场传感模块。考虑到超声波传感器、红外线传感器都存在局限性,系统提供了A/D信息输入接口(如压敏传感器输入)。同时,为了处理外部中断事件提供了信号输入接口。我们自己开发研制了红外线探测模块、超声波探测模块。

由于时间有限,该环境感知系统还没有应用于移动机器人系统中。不过,环境感知系统中的模块都已经完成。为了缩小系统,我们建立了单片机环境感知系统。该系统包括8路红外线探测模块,8路超声波测距模块和地磁场传感模块,能够有效地感知环境。系统框图如图4-3所示,感知系统与主控板系统(ARM板)采用RS232通讯,进行环境信息交互。

下面我们依次介绍超声波探测模块和红外线探测模块,顺便介绍一下地磁场传感模块。

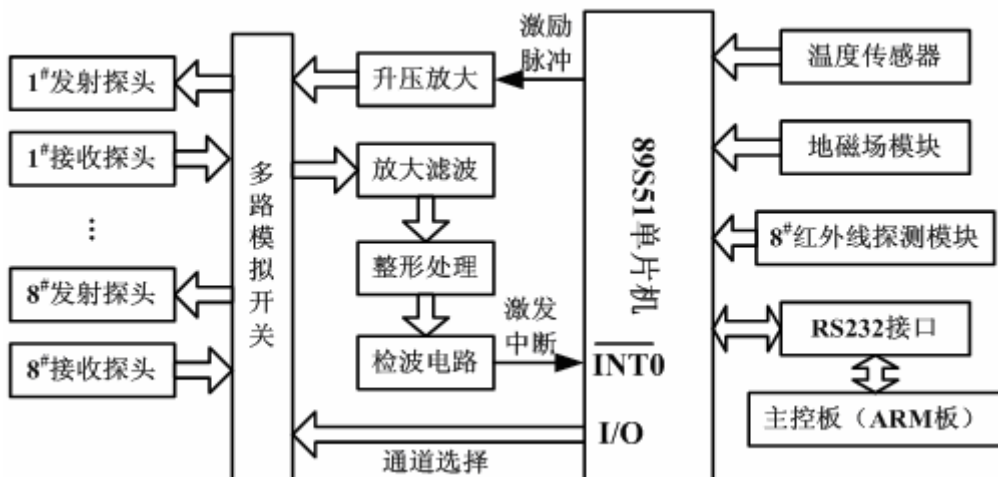


图4-3 单片机环境感知系统硬件框图

### 4.3 超声波测距模块

在移动机器人中应用的超声波传感器,是利用超声波在空气中的定向传播和固体反射特性(纵波),通过接收自身发射的超声波反射信号,根据超声波发出及回波接收时间差及传播速度,计算出传播距离,从而得到障碍物到机器人的距离。从发射波束特性知,由于扩散角的原因,使超声测距的角度分辨率较低,但距离分辨率较高(1cm左右),目前最大探测距离为15米,最小盲区0.3—0.4米。超声波传感器具有反应灵敏、探测速度快(一个测量周期仅需几十毫秒)的优点,而且结构简单,体积小,成本低,因而在目前已知的实验型和应用型移动机器人中,多数都安装了它,用于室内和室外近距离避(停)障。通常,以多个传感器组成阵列形式,根据单个传感器扩散角及反射特性,确定合理的密度,已覆盖要求的探测区。

总的来说,超声波传感器的造价低廉、速度快、距离分辨率较高,通过信息融合可较准确地反映环境信息,所以在移动机器人系统中得到了广泛的应用。目前,移动机器人系统中都采用了超声波传感器进行环境感知,在我们系统中超声波测距模块用于基点相对坐标定位和局部区域环境感知。为了满足移动机器人系统实际需要,我们研制了多路超声波传感器测距的模块。

#### 4.3.1 超声频率特性

超声波的频率特性曲线如图4-4所示, $f_0$ 为超声发射器的中心频率,在 $f_0$ 处超声发射器所产生的声压能级最高,而在中心频率 $f_0$ 两侧,声压能级迅速衰减。也就是说,当超声发射器工作在中心频率 $f_0$ 附近时,要么探测的有效范围小,要么难以达到超声接收电路所要求的强度。因此,要使超声传感器的工作灵敏度高,一定要使用非常接近中心频率 $f_0$ 的交流电压来

激励。当然，也可以利用这种特性来在线调节超声测距系统的有效探测范围和扩散角大小。我们选用的超声波传感器的中心频率为40KHz，这就决定了给予探头的激励电信号的中心频率也为40KHz。又由于探头对于信号频率变化的敏感程度比较高，稍微偏离额定的中心频率，就会使探头的发射声强明显衰减。因此，产生所需额定振荡信号和保证信号中心频率的相对稳定就是超声波振荡信号发生电路的主要任务。同时，对于已有的信号源，怎样改善其信号的输出功率，使其很好与外部传感器相互匹配也是一个值得考虑的因素。

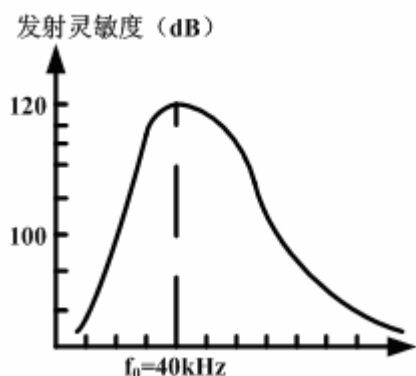


图4-4 超声波发射器的频率特性曲线

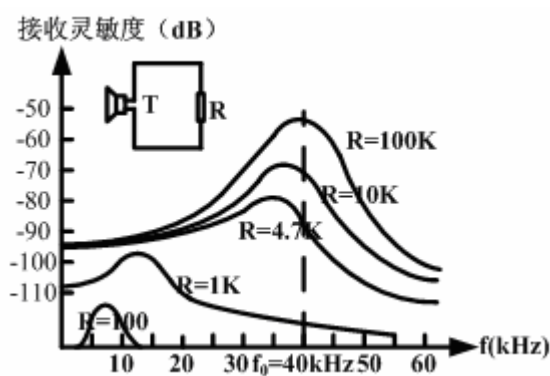


图4-5 超声波接收器的频率特性曲线

超声波测距系统能否有效地工作关键在于，使超声发射器与接收器协调一致工作。图4-5为超声波接收器的频率特性。从图中可以看出，超声波接收器的频率特性与其匹配电阻R有很大关系。如果匹配电阻R很大（大于100K $\Omega$ ），则频率特性是尖锐共振的，并且在共振频率点（中心频率附近）处有很高的灵敏度；如果R较小（小于10K $\Omega$ ），频率特性曲线变得平滑而且带宽较宽，同时接收灵敏度也随之降低，共振频率点向稍低频段移动。

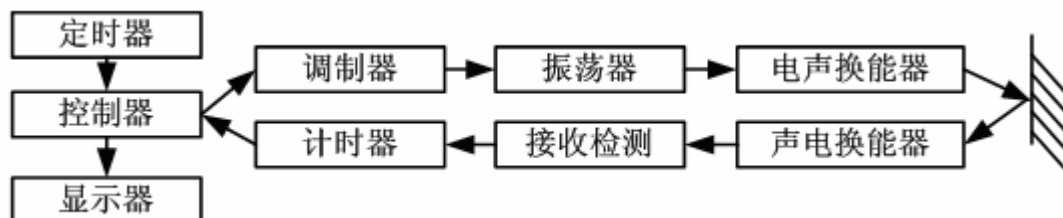


图4-6 超声波测距原理框图

### 4.3.2 超声波测距工作原理

超声波测距是通过不断检测超声波发射后遇到障碍物所反射的回波，从而测出发射和接收回波的时间差  $\Delta T$ ，然后求出距离  $S$ 。在速度  $V$  已知的情况下，距离  $S$  的计算，公式如下：

$$S = V \cdot \Delta T / 2 \quad (4.1)$$

在空气中，常温下超声波的传播速度是 334 米/秒，但其传播速度  $V$  易受空气中温度、湿度、压强等因素的影响，其中受温度的影响较大，如温度每升高 1 $^{\circ}\text{C}$ ，声速增加约 0.6 米/秒。因此在测距精度要求很高的情况下，应通过温度补偿的方法对传播速度加以校正。已知现场环境温度  $T_{ep}$  时，超声波传播速度  $V$  的计算公式如下：

$$V = 331.5 + 0.607T_{ep} \quad (4.2)$$

由公式4.2可以计算出表4-1标出的声速与温度关系。这样，只要测得超声波发射和接收回波的时间差  $\Delta T$  以及现场环境温度  $T_{ep}$ ，就可以精确计算出发射点到障碍物之间的距离，这

就是超声波测距仪的机理。其超声波测距原理框图如图4-6所示。

表4.1 声速与温度关系表

温度 (°C)	-30	-20	-10	0	10	20	30	100
声速 (m/s)	313	319	325	332	338	344	349	386

### 4.3.3 超声波测距系统硬件电路

超声波传感器主要有三种测距方法:相位检测法、声波幅值检测法和时间检测法。相位检测法虽然精度高,但检测范围有限;声波幅值检测法易受反射波的影响;时间检测法的工作方式简单,直观,在硬件控制和软件设计上都非常容易实现。其原理为:检测从发射换能器发出的超声波,经气体介质传播到接收换能器的时间,即渡越时间。由于在设计室内移动机器人时主要考虑控制和实现的简便性,从上面的讨论可知:采用渡越时间检测法的超声波传感器是最佳选择。在我们研究的多路超声波模块中采用了时间检测法进行测距。

整个超声波测距系统电路主要实现以下三种功能:其一是接收和识别主控板系统命令;其二是根据命令测量某一方向或某几个方向距离,该过程包括自主判断数据真伪及数据融合;其三是将距离数据上传主控板系统。更详细地可以划分为以下几个功能模块:40KHz的振荡信号的发生及发射匹配电路,超声波信号的接收和预处理电路,路选控制电路。为了缩小系统,我们设计的超声波系统中有8组超声波探头,分别测试八个方向的距离,而在前文提到的基于ARM的环境感知系统中是24对超声波探头。系统中模拟多路开关选用ADG408芯片,通过单片机输出三路控制信号,控制八路信号之间的切换,这部分电路不作介绍。下面我们只要介绍超声波测距电路中的发射电路和接收电路。

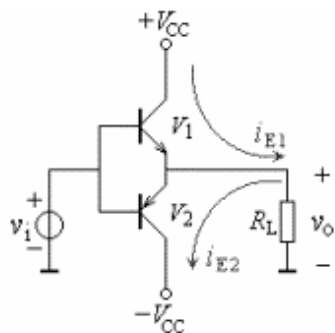


图4-7 乙类互补功率放大电路

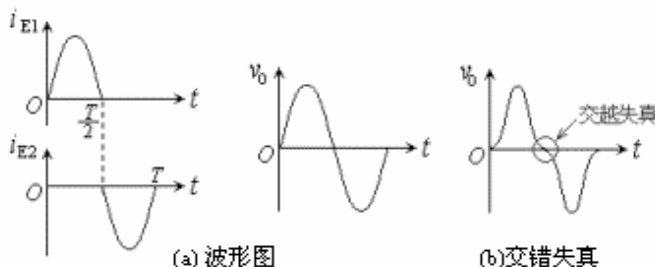


图4-8 波形图

#### (1) 发射及发射匹配电路

由超声波特性可知:要提高超声波传感器测量范围就必须提高加载在超声波发射探头上的正弦电压,同时发射电路要具有一定的负载能力。根据超声波发射电路特点和硬件电路设计思想,超声波发射电路总体思想是:通过单片机I/O口输出的40KHz脉冲信号,再通过放大升压电路将脉冲电压幅值升至20V以上,以满足超声波传感器发射器的要求。我们为升压电路设计了两种方案:乙类互补功率放大电路和脉冲变压器放大电路。

乙类互补功率放大电路如图4-7所示,它由一对NPN、PNP特性相同的互补三极管组成,图中V1、V2分别为NPN、PNP型三极管。这种电路也称为OCL互补功率放大电路。当输入信号处于正半周时,且幅度远大于三极管的开启电压,此时NPN型三极管导电,有电流通过负载 $R_L$ ,按图中方向由上到下,与假设正方向相同。当输入信号处于负半周时,且幅度远大于三极管的开启电压,此时PNP型三极管导电,有电流通过负载 $R_L$ ,按图中方向由下到上,与假设正方向相反,于是两个三极管一个正半周、一个负半周轮流导电,在负载上将正半周和负半周合成在一起,得到一个完整的不失真波形,如图4-8(a)所示。严格说,输入信号很小

时,达不到三极管的开启电压,三极管不导电。因此在正、负半周交替过零处会出现一些非线性失真,这个失真称为交越失真(如图4-8(b)所示)。

超声波发射乙类互补功率放大电路如图4-9所示,图中比较器LM393用来将单片机输出的0V至5V的脉冲信号转换成-12V至+12V的脉冲信号,用于驱动后面的乙类互补功率放大电路。R4和C1用于超声波发射换能器的阻抗匹配,调节加载在换能器上的脉冲信号波形。

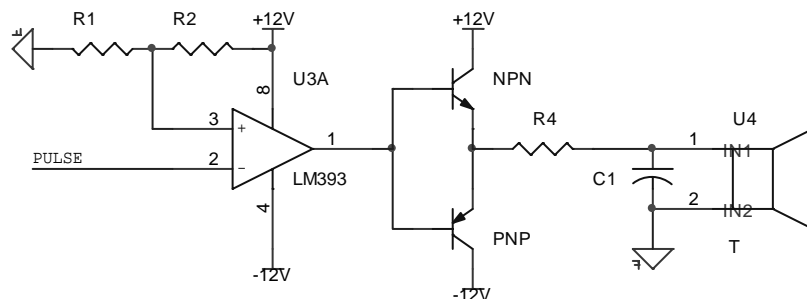


图4-9 乙类互补功率发射电路

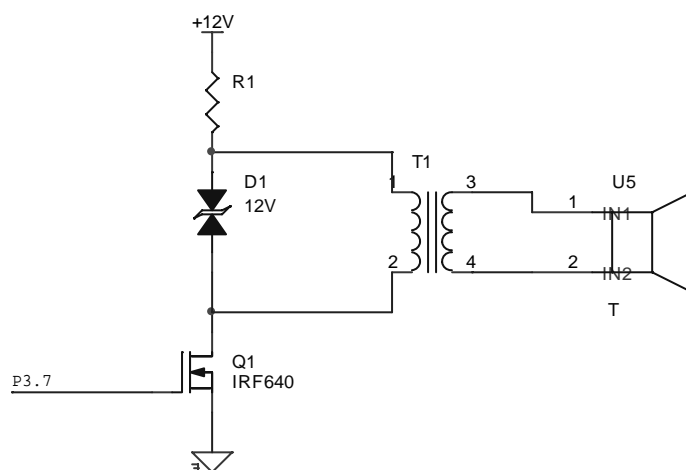


图4-10 变压器升压发射电路

变压器放大电路主要是由一个含有大功率CMOS管IRF640的放大电路、变压器和一个超声波发射换能器构成。如图4-10所示。相比乙类互补功率放大电路,该电路只须单电源供电,缩小系统。不过要设计适与超声波阻抗匹配的脉冲变压器很困难,鉴于这个原因,在我们系统里采用了乙类互补功率放大电路来驱动超声波发射探头。

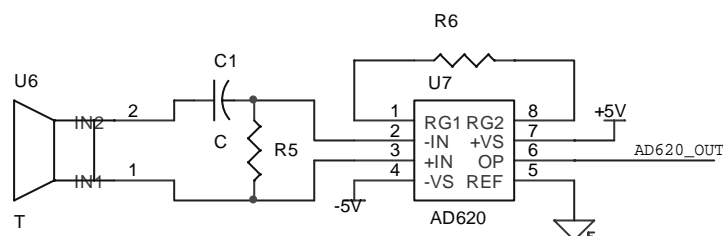


图4-11 前置放大电路

## (2) 接收和预处理电路

超声波接收电路包括四部分内容:前置放大、滤波、后置放大和检波。

由超声波接收探头所引入的交变电压信号是十分微小的。在一般情况下,如果反射面是

良好的,同时又是在有效测量距离之内,则由探头直接获得的电压幅值在50mv—150mv之间。对于这样的微小信号,是很难进一步处理的。因此,在信号预处理的环节中,首先必须完成的是信号的放大。

前置放大电路包括无源高通滤波电路和AD620放大电路组成(如图4-11)。AD620为一个低成本,高精度的单片仪器放大器。为三运放集成的仪表放大器结构,为保护增益控制的高精度,其输入端的三极管提供简单的差分双极输入,并采用 $\beta$ 工艺获得更低的输入偏置电流,通过输入级内部运放的反馈,保持输入三极管的集电极电流恒定,并使输入电压加到外部增益控制电阻 $R_6$ 上。尽管AD620由传统的三运算放大器发展而成,但一些主要性能却优于三运算放大器构成的仪表放大器的设计,如电源范围宽( $\pm 2.3V \sim \pm 18V$ ),设计体积小,功耗非常低(最大供电电流仅1.3mA),因而适用于低电压、低功耗的应用场合。

经过放大后的信号中会出现各种干扰,需要进行滤波处理;同时,由于接收到的是以超声波频率为载波的调制波形,真正有用的是其包络信号(决定接收的时间),因此,在滤波的基础上,需要借助于包络检波电路,最终获得有用的信号。

滤波实质就是一种选频电路,能让指定频段的信号通过,而将其余频段上的信号加以抑制。在本课题中,采用有源带通滤波方法。它是由一个截止频率为 $f_{OH}$ 的低通滤波器和一个截止频率为 $f_{OL}$ 的高通滤波器组成(只要满足小于 $f_{OH}$ 大于 $f_{OL}$ 的条件),其电路原理图如图4-12所示:

其传递函数为:

$$A(s) = \frac{A_{VF}s(1/R7C1)}{s^2 + s \left[ \frac{1}{R8C2} + \frac{1}{R8C1} + \frac{1}{R7C1} + \frac{1}{R9C1}(1 - A_{VF}) \right] + \frac{R7 + R9}{R7R8R9C1C2}} \quad (4.3)$$

$$A_{VF} = 1 + R11/R10 \quad (4.4)$$

不妨令:

$$\begin{aligned} A_0 &= \frac{A_{VF}}{R7C1 \left[ \frac{1}{R8C2} + \frac{1}{R8C1} + \frac{1}{R7C1} + \frac{1}{R9C1}(1 - A_{VF}) \right]} \\ \omega_0^2 &= \frac{R7 + R9}{R7R8R9C1C2} \\ Q &= \frac{\sqrt{R7 + R9} \sqrt{R7R8R9C1C2}}{R7R9(C1 + C2) + C2R8[R9 + R7(1 - A_{VF})]}, \text{ 则:} \\ A(s) &= \frac{A_0 \frac{1}{Q} s \omega_0}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q} s + \omega_0^2} = \frac{A_0 \frac{1}{Q} \frac{s}{\omega_0}}{\left( \frac{s}{\omega_0} \right)^2 + \frac{1}{Q} \frac{s}{\omega_0} + 1} \quad (4.5) \end{aligned}$$

式4.5中 $\omega_0$ 称为中心角频率,令 $s = j\omega$ ,根据上式不难求出其频率响应曲线 $Q$ 。已知 $Q$ 和 $\omega_0$ ,利用 $BW = \omega_0/2\pi Q$ 可计算出带通滤波器的带宽。

通常情况,我们取 $R7=R9=R$ , $R8=2R$ , $C1=C2=C$ 。则有:

$$A(s) = \frac{A_{VF} sRC}{(sRC)^2 + sRC(3 - A_{VF}) + 1} \quad (4.6)$$

取  $s = j\omega$ ,  $f_0 = 1/2\pi RC$ , 代入式4.6, 可得:

$$A(j\omega) = \frac{1}{1 + j \frac{1}{3 - A_{VF}} \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)} \times \frac{A_{VF}}{3 - A_{VF}} \quad (4.7)$$

可见, 当  $f=f_0$  时, A 的模最大。由于中心频率  $f_0$  为 40kHz, 显然, 当式 4.7 中分母的虚部为 1 时, A 的绝对值为:

$$|A| = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{A_{VF}}{3 - A_{VF}}$$

$$\text{另: } \left| \frac{1}{3 - A_{VF}} \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right) \right| = 1$$

求得解为:

$$f_1 = \frac{f_0}{2} \left[ \sqrt{(3 - A_{VF})^2 + 4} - (3 - A_{VF}) \right], \quad f_2 = \frac{f_0}{2} \left[ \sqrt{(3 - A_{VF})^2 + 4} + (3 - A_{VF}) \right]$$

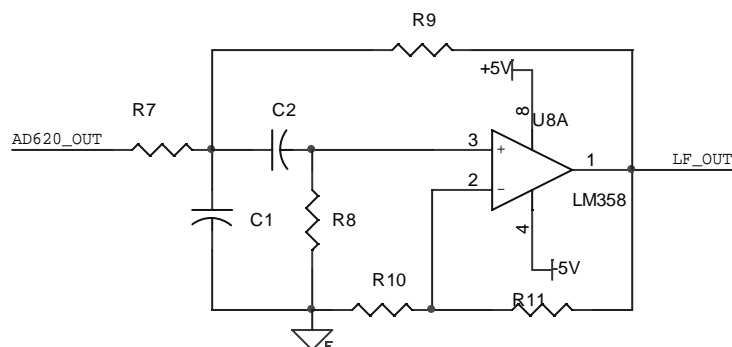


图4-12 带通滤波电路

最后, 求得此电路的解:  $R7=R9=4K$ ,  $R8=8K$ ,  $C1=C2=1000pF$ ,  $R10=3K$ ,  $R11=5.5K$ , 中心频率为 40kHz, 带通截至频率为  $f_1=37.114kHz$ ,  $f_2=43.780kHz$ 。

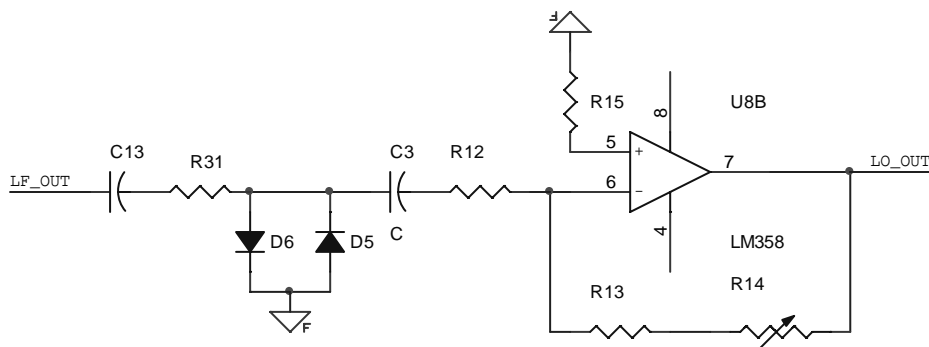


图4-13 反向放大电路



由于前置放大电路放大倍数不宜过大,接收信号经前置放大后信号可能还比较小,所以信号还需要进一步放大。在实际的系统中,我们采用了运放LM357来构成负反馈的放大电路,反向放大电路包括限幅电路和放大电路(如图4-13)。LF\_OUT为信号输入端,LO\_OUT为信号输出端,R13,R14构成了反馈放大回路。

在实际设计中,取 $R_{12} = R_{13} = 100K$ , $R_{13} = 500K$ ,则整个负反馈放大电路的放大倍数为 $A_f = 6$ 。对于50mV-150mV的输入信号,经过前置放后,信号幅值范围为1v-3v,经限幅电路后,信号幅值范围0V-0.7V,经反向放大后,信号幅值范围为0V-4.2V,显然恰好落在了运放的供电电压范围内,可以实现其正常工作。

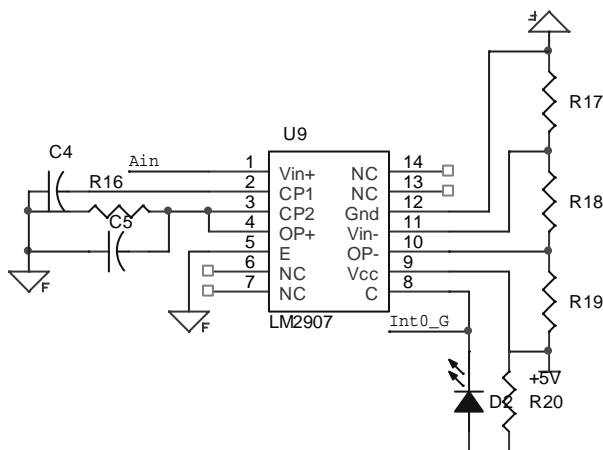


图4-14 LM2907FV转换芯片应用电路

滤波完成后要完成信号的包络检波,从而获得发射时调制的包络波形。这个过程由检波电路实现的。这对超声波检波过程国内外提出了不少方法,我们这里选用一块工业用集成电路芯片LM2907,通过外加个别电阻和电容,实现信号检波功能。

LM2907是具有高增益运算放大器的单片频率转换器,它被设计用于当输入频率达到或超过一个选定值时,输出具有一定带负载能力的控制信号。它使用了一种充电泵技术来实现频率到电压(电流)的转换,同时在输入极提供了全输入保护,并在低纹波下的倍频和零频率输入时,输出摆动到地。整个LM2907从原理上可划分为三个部分,分别为输入差分放大级、频率电压转换级、比较输出级。第一级是驱动正反馈触发器电路的差分放大器,输入阈值电压是使这一级的输出改变状态的差动输入电压值。当有一端接地时,输入信号在地的上下摆动,摆动的幅值超过阈值时,就会产生输出。采用差动输入的形式是为了让使用者建立自己所需要的输入转换电平,并使这个电平周围存在迟滞,从而产生很好的噪声抑制作用。在实际中,我们利用LM2907的这一特性,将差动输入的一端与信号地相连,从而识别相对于信号地摆动的交变输入信号。在此基础上,还将其抬高了一微小电平 $V_{in-}$ (如图4-14中所示),目的是设置一可调的阈值电平,充分发挥其抑制噪声信号的功能。紧跟输入级的是输入频率转换为直流电压的充电泵。为了实现其功能,需要外接一个定时电容,二个输出电阻和一个积分或滤波电容(如图4-14)。当输入级状态改变时(即有信号输入时),定时电容在差值为 $V_{CC}/2$ 的两个电压之间线性地充电或放电。那么,在输入频率的一半周期,即 $1/(2 \cdot f_{in})$ 的时间内,在定时电容上的电荷变化为 $V_{CC}/2 \cdot C_5$ 。则电容器泵入或泵出的平均电流为:

$$\frac{\Delta Q}{T} = i_c (AVG) = C_5 \times \frac{V_{CC}}{2} \times (2f_{in}) = V_{CC} \times f_{in} \times C_5 \quad (4.8)$$

输出电路能够非常精确地反映这个进入接地负载电阻R16的电流。这样,假如电流脉冲

用一滤波电容 $C_5$ 积分,则有:

$$V_o = i_c \times R_{16} \quad (4.9)$$

将公式4.8代入公式4.9,可得:

$$V_o = V_{CC} \times f_{in} \times C_5 \times R_{16} \times K \quad (4.10)$$

式4.8中 $K$ 为增益常数,典型取值为1。这就是说,LM2907的3脚上充电泵输出端的电压 $V_o$ 精确的反映了输入信号的频率 $f_{in}$ 。(在 $C_4$ 、 $C_5$ 和 $R_{16}$ 确定时)。

最后一部分为比较输出级,它是将 $V_o$ 的值与预先设定的电压相互比较,产生输出控制信号,并通过一级放大管使其具有一定的驱动负载能力。显然,在实际的应用中,只要根据式4.10适当的选择 $C_5$ 、 $C_4$ 和 $R_{16}$ 的值,使输入信号的频率,只有大于所要求的频率时,才产生输出,从而完成了鉴频的作用。又由于比较输出级输出的是跳变的脉冲信号,因此,实际上完成了包络检波的功能。当然从滤波的角度讲,LM2907只起到了高通滤波器的作用,对于高频的干扰信号还需利用前文提到的有源滤波电路中的低通部分。

#### 4.4 多路红外探测模块

超声探测具有自身的局限性(如镜面反射,盲区),在移动机器人环境感知系统中,往往安装一些红外传感器。大量成功实例表明:超声传感器和红外传感器信息互补是比较有效的;红外传感器虽然测距精度不高,但是它的角分辨率较高,而且不会出现超声传感器常遇到的镜面反射问题;相反,超声波传感器测距精度较高,但其角分辨率低。这两种传感器的组合使用,显然可取长补短,获得比单传感器更好的效果。

红外线探测的原理与超声探测原理比较相似,都是通过信号激励发射和目标反射的方式来进行环境探测。红外线传感器的探测距离一般比较短,通常被用来探测近距离目标,其输出为0或1开关量。红外线传感器可适当地增加发射电压和调整发射频率,来调节有效探测范围。一般在静态时工作电流为25mA左右,而在动态工作时可达60mA。故而,红外线传感器的探测信号会对感知系统产生比较大的冲击影响。所以,在设计红外线探测模块时,采用光电隔离的红外线探测模块。红外线传感器的数学模型可以用图4-15表示,图中 $d_s$ 为红外线传感器感知的最大有效范围,由此其数学模型可表示为:

$$p(z_0 | d_0 = x) = \begin{cases} 0, & \text{if } d_0 > d_s \\ 1, & \text{其他} \end{cases}$$

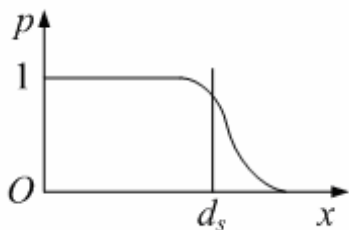


图4-15 红外线传感器数学模型

红外线应用电路如图4-16所示,电路中利用锁相环芯片LM567,采用8脚双列直插塑封。其⑤、⑥脚外接的电阻和电容决定了内部压控振荡器的中心频率 $f_2$ ,  $f_2 \approx 1/1.1RC$ 。其①、②脚通常分别通过一电容器接地,形成输出滤波网络和环路单级低通滤波网络。②脚所接电容决定锁相环路的捕捉带宽:电容值越大,环路带宽越窄。①脚所接电容的容量应至少是②脚电容的2倍。③脚是输入端,要求输入信号 $\geq 25\text{mV}$ 。④脚是逻辑输出端,其内部是一个集电极开路的三极管,允许最大灌电流为100mA。LM567的工作电压为4.75~9V,工作频率从直流到500kHz,静态工作电流约8mA。LM567的内部电路及详细工作过程非常复杂,这里仅将其基本功能概述如下:当LM567的③脚输入幅度 $\geq 25\text{mV}$ 、频率在其带宽内的信号时,④脚由高电

平变成低电平, ②脚输出经频率/电压变换的调制信号; 如果在器件的②脚输入音频信号, 则在⑤脚输出受②脚输入调制信号调制的调频方波信号。在图2的电路中利用LM567的⑤脚脉冲信号驱动红外发光管, 利用了③脚接收到相同频率的载波信号后⑧脚电压由高变低这一特性, 来形成对障碍物的检测。

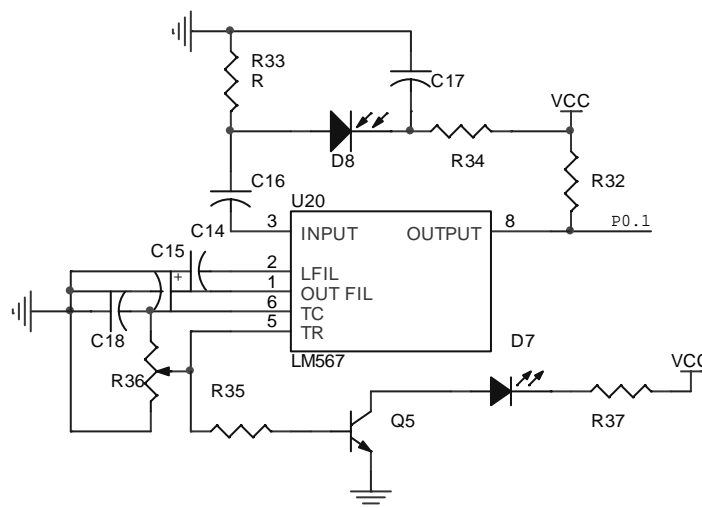


图4-16 红外线传感器电路图

#### 4.5 地磁场传感器模块

我们采用一款低成本两轴数字罗盘模块，其输入电压低，功耗小。该罗盘以RS232接口十六进制方式与上位机进行通信。精度高，运行稳定，动态平衡调整，并具有标定及越陷报警的功能。表4.2是数字罗盘技术参数。

表4.2数字罗盘技术参数表

项目	参数	单位	备注
测量范围	0° - 360°	度	罗盘水平放置
显示分辨率	1	度	
精度	< 2	度	
响应频率	25	Hz	50Hz内可调
电压	5V	VDC	或6-9VDC
工作电流	< 30	mA	5V连续输出模式

## 4.6 系统控制芯片

核心控制器可以称为整个机器人系统的“心脏”，它承担了整个系统的指挥、协调、数据存储和计算的功能。系统的性能和容量很大程度上是由控制器的性能决定的。在移动机器人系统中，核心控制器主要完成了以下几方面的功能：

- (1) 与主控板系统通信,接收命令并处理命令;
- (2) 读取温度传感器测量的温度值,用于测量距离的温度补偿;
- (3) 通过自身的I/O口,实现多路信号的路选控制;
- (4) 从I/O口发射40KHz脉冲信号,驱动超声波发射换能器工作,同时处理超声波反射信号,

记录时间，并计算相应的距离参数；

近几年来，MCS51系列与MCS-96系列单片机得到了广泛的应用，虽然十六位的96系列比起八位的51系列来说容量大，扩展功能更多，但其较高的性能更适用于复杂的高性能要求的应用场合。对于本课题来说，51系列单片机的基本功能和特性已满足要求，并对将来的进一步完善留有可开发的余地。且八位机是我国当前应用最为普通的机种，在相当长的一段时期内占据着主导地位，已被很成熟地应用于多方面的测控工作之中，所以基于上述要求和原因，我们决定采用ATMEL公司研制的8位高档MCS51系列中的89S52单片机。89S52单片机的各个I/O口功能说明见表4.3，单片机应用电路如图4-17所示。

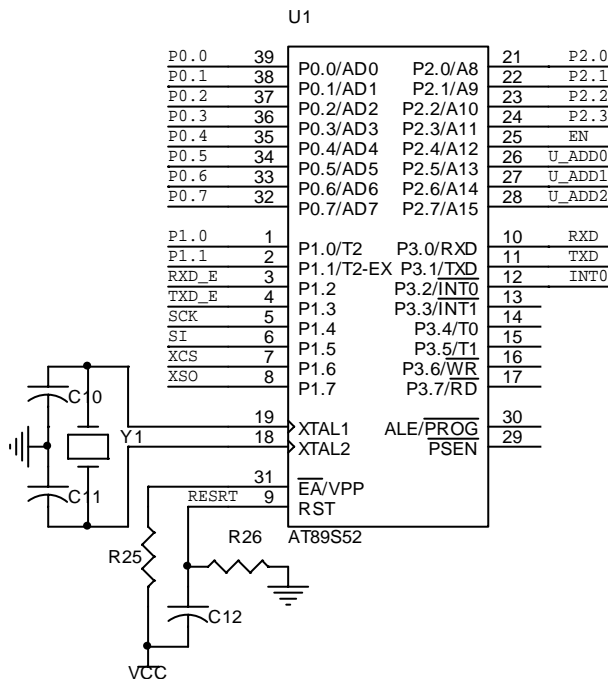


图4-17 系统控制芯片

表4.3 89S52单片机的I/O功能表

端口标识	功能说明
P0.0~P0.7	8个红外线传感器信号接口
P1.2~P1.3	地磁场传感器通讯接口
P2.4~P2.7	多路选择开关控制端口
P1.0	温度传感器数据输入端
P1.1	超声波发射探头脉冲信号
P1.4~P1.7	外围芯片X25045的读写控制

## 4.7 其外围芯片

在选择了89S52单片机作为核心控制器芯片后，针对产品开发这一特点，为了提高整个系统运行的稳定性和实用性，我们在设计系统电路时，也同时选用了一些外围的支持芯片，以完善一些实用的功能。

### 4.7.1 复位电路

对于51系列的单片机,在使用中最大的缺陷就是缺少了看门狗(WATCHDOG)功能。如果在外界突然的干扰下,程序走飞了,就需要通过看门狗的功能实现系统的恢复运行。另一个经常碰到的问题就是对系统电路电压的监控。一旦系统电压低于正常值时,就暂停系统的工作状态。这些实用功能都可以通过选用一些外围的支持芯片来实现。在智能吸尘机器人系统的电路设计中,我们选择了Xicor公司的“可编程看门狗监控E<sup>2</sup>PROM”芯片X25045。该芯片结合了三种最常用的功能:

(1) 看门狗定时器对微控制器提供了独立的保护系统。当系统故障时,在可选的超时周期(timeout interval)之后,X25045将通过单片机的RESET脚,产生硬件复位信号。用户可从三个预定的值中选择此周期,一旦选定后,即使掉电,此周期也不会改变。

(2) X25045提供低V<sub>cc</sub>检测电路,可以保护系统使之免受低电压状况的影响。当V<sub>cc</sub>下降到最小V<sub>cc</sub>转换点以下时,X25045使单片机系统复位,该复位一直确保到V<sub>cc</sub>返回且稳定为止。

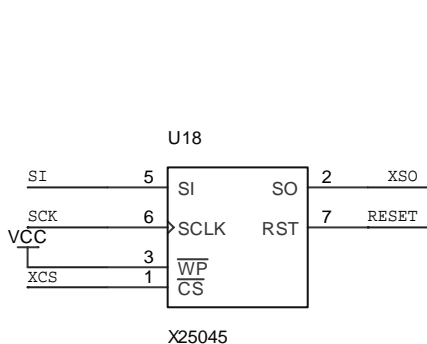


图4-18 X25045应用电路

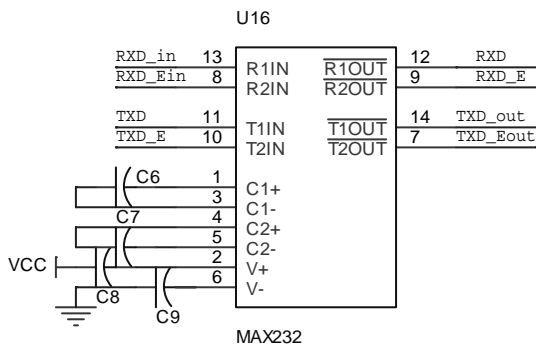


图4-19 MAX232接口电路图

(3) X25045提供512字节的E<sup>2</sup>PROM,可通过单片机的串行口对其在线的读写,从而进一步扩展了系统的数据存储能力。X25045在本系统中的应用电路(也是其典型应用)如图4-18所示。图中,7脚RESET信号与单片机的复位端相连;/CS是片选信号;串行输入SI和串行输出SO用两根单片机的I/O口;SCLK是读写时的时钟信号。

### 4.7.2 通讯电路

该超声波测距系统要将系统测量的距离数据值传输给主控板系统,数据通信采用RS232,接口芯片为MAX232。接口电路图如图4-19。

## 4.8 电源电路

系统电源模拟部分电源有 $\pm 5V$ ,  $\pm 12V$ , 数字部分电源有5V。系统采用24V单电源供电,利用三片DC—DC模块提供电源。一块提供 $\pm 12V$ 模拟电压,一块提供 $\pm 5V$ 模拟电压,还有一块提供5V数字电压。

## 4.9 其他电路

系统中数字模拟信号和单片机的连接采用光电隔离，所选高速的光耦6N137，其他光耦很难达到40KHz的频率。此外，系统中还有用于超声波测距模块用于温度补偿的温度测量模块，我们采用温度传感器DS18B20，直接与单片机I/O口相连，如图4-20所示。

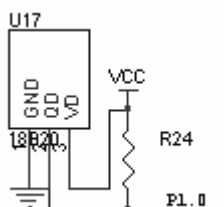


图4-20 18B20温度传感器应用电路

## 4.10 本章小结

目前，环境感知系统的研究是机器人研究的热点问题之一，环境感知系统的研究也推动了多传感器数据融合问题的研究。本章结合矩形环境建模需要，建立了面向移动机器人的嵌入式环境感知系统。该系统包括超声波测距模块，红外线探测模块和地磁场传感器模块。重点叙述超声波测距模块的研制，包括超声波特性，超声波测距原理及硬件结构。经过大量的实验，我们设计的环境感知系统很够很好地应用到我们的完全遍历系统中。

## 第五章 移动机器人完全遍历控制系统

移动机器人要完成完全遍历，首先要了解环境，即完成环境感知；接着通过完全遍历算法确定行走路径；最后控制电机行走。在前一章节中，详细介绍了面向移动机器人的嵌入式环境感知系统。在本章中，我们主要介绍实现完全遍历算法的主控板系统和驱动直流电机的电机控制系统，最后，介绍了基于硬件结构的完全遍历控制流程。

### 5.1 完全遍历系统硬件构成

整个完全遍历系统有三个子系统组成：主控板系统（ARM 板）、环境感知系统和电机控制系统，如图 5-1 所示。主控板系统通过串口与环境感知系统交互信息，从环境感知系统中得到距离信息和方位信息。主控板系统与电机驱动系统有两种交互方式：RS232 串行通信，I/O 口直接通信。电机驱动系统是个闭环的控制系统，主控板系统可直接向电机驱动系统发出控制命令驱动电机。为了更高效地控制电机，速度更快，主控板系统可以直接通过自身所带的 PWM 模块驱动电机，并且直接接收位置脉冲信号，计算位置。环境感知系统包括距离测量模块和方位测量模块（见上一章节），电机驱动系统主要包括电机驱动模块和位置检测模块，在下面我们作详细介绍。



图 5-1 完全遍历系统硬件框图

### 5.2 ARM 主控板系统

ARM 主控板系统用于完全遍历算法，其主要任务是：1) 从环境感知系统中获取距离信息和方位信息，进行环境建模和完全遍历路径规划；2) 控制电机行走。在环境建模和完全遍历路径规划过程中，需要存储位置信息和路径规划信息，同时要要进行完全遍历算法的运算。为了使系统具有更好的实时性，我们才用了速度很快的 ARM 板作为整个完全遍历系统的主控板系统。

### 5.2.1 主板 LPC2210CPU 概述

LPC2210是基于一个支持实时仿真和嵌入式跟踪的16/32位ARM7TDMI-S™CPU的微控制器。对代码规模有严格控制的应用可使用16位Thumb模式将代码规模降低超过30%，而性能的损失却很小。

由于LPC2210的144脚封装、极低的功耗、多个32位定时器、8路10位ADCPWM输出以及多达9个外部中断使它们特别适用于工业控制、医疗系统、访问控制和POS机。

通过配置总线，LPC2210最多可提供76个GPIO。由于内置了宽范围的串行通信接口，它们也非常适合于通信网关、协议转换器、嵌入式软modem以及其它各种类型的应用。其特性如下：

- 16/32位144脚ARM7TDMI-S微控制器；
- 16K字节片内静态RAM；
- 串行boot装载程序通过UART0来实现在系统下载和编程；
- 通过外部存储器接口可将存储器配置成4组每组的容量高达16Mb数据宽度为8/16/32位；
- EmbeddedICE-RT接口使能断点和观察点当前台任务使用片内RealMonitor软件调试时中断服务程序可继续执行；
- 嵌入式跟踪宏单元ETM支持对执行代码进行无干扰的高速实时跟踪；
- 8路10位A/D转换器转换时间低至2.44ms；
- 2个32位定时器带4路捕获和4路比较通道PWM单元6路输出实时时钟和看门狗；
- 多个串行接口包括2个16C550工业标准UART高速I<sup>2</sup>C接口400 kbit/s和2个SPI接口；
- 向量中断控制器可配置优先级和向量地址；
- 多达76个通用I/O口可承受5V电压12个独立外部中断引脚EIN和CAP功能；
- 通过片内PLL可实现最大为60MHz的CPU操作频率；
- 片内晶振频率范围1~30MHz；
- 2个低功耗模式空闲和掉电；
- 通过外部中断将处理器从掉电模式中唤醒；
- 可通过个别使能/禁止外部功能来优化功耗；
- 双电源
  - CPU操作电压范围1.65~1.95 V(1.8 V± 8.3%)；
  - I/O操作电压范围3.0~3.6 V(3.3 V± 10%)。

在我们研究的嵌入式感知系统中，主要用到LPC2210CPU中以下几个功能模块：UART0 & 1 模块、捕捉/比较模块、A/D转换器、PWM0模块、外部中断模块和部分通用IO口。下面分别介绍串行通信模块、PWM模块和A/D转换器模块。

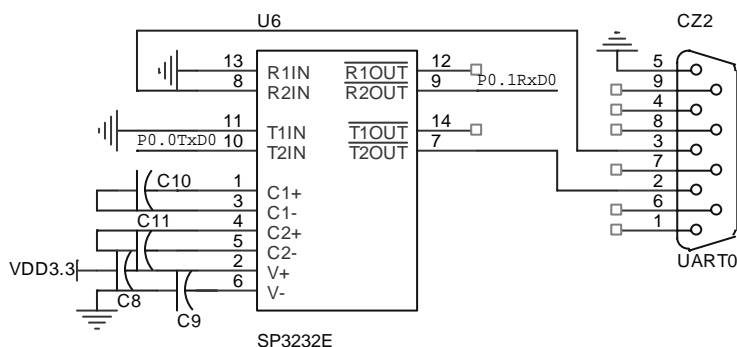


图 5-2 UART0 串口



### 5.2.2 RS232 通讯电路

利用主控板系统UART0&1分别与单片机环境感知系统和电机驱动系统通信。由于系统是3.3V系统，所以UART0使用了SP3232E进行RS232电平转换（见图5-2），SP3232E是3V工作电源的RS232转换芯片。另外，系统中带有8路的RS232转换芯片SP3243ECA，可用于UART1带有的完整调制解调器（MODEM）接口，通过JP3跳线将UART1用作主控板系统与电机驱动系统的串行通信（见图5-3）。

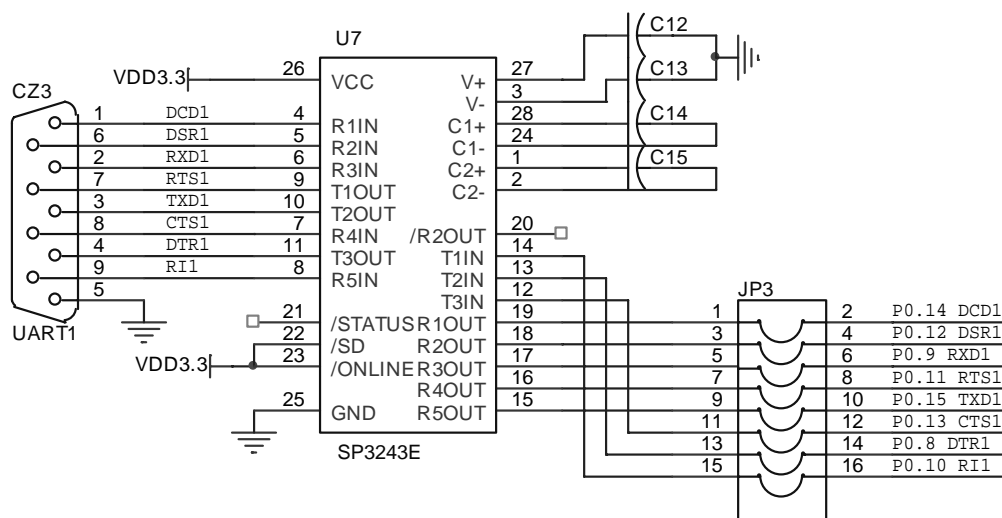


图 5-3 UART1 串口

### 5.2.3 脉宽调制器（PWM）电路

LPC2210的脉宽调制器建立在标准定时器I/O之上，应用可在PWM和匹配功能当中进行选择。PWM基于标准的定时器模块并具有其所有特性，不过LPC2210只将其PWM功能输出到管脚。定时器对外设时钟（pclk）进行计数，可选择产生中断或基于7个匹配寄存器。在到达指定的定时值时执行其它动作。它还包括4个捕获输入，用于在输入信号发生跳变时捕获定时器值，并可选择在事件发生时产生中断。PWM功能是一个附加特性，建立在匹配寄存器事件基础之上。

### 5.2.4 A/D 转换器

LPC2210具有8路10位ADC转换器，其参考电压为3.3V（由V3a引脚提供）。参考电压的精度会影响ADC转换结果。A/D转换器的基本时钟由VPB时钟提供，可编程分频器可将时钟调整至逐步逼近转换所需的4.5MHz，最大完全满足精度要求的转换需要11个这样的时钟。

A/D转换器特性：

- 10位逐次逼近式模数转换器；
- 8路输入；
- 掉电模式；
- 测量范围0~3V；
- 10位转换时间 $\geq 2.44\mu s$ ；

- 一个或多个输入的突发转换模式；
- 可选择由输入跳变或定时器匹配信号触发转换。

## 5.3 电机驱动系统

### 5.3.1 直流电机驱动概述

在直流电机驱动电路的设计中，主要考虑以下几点：

(1) **功能：**电机是单向还是双向转动？需不需要调速？对于单向的电机驱动，只要用一个大功率三极管或场效应管或继电器直接带动电机即可，当电机需要双向转动时，可以使用由4个功率元件组成的H桥电路或者使用一个双刀双掷的继电器。如果不需要调速，只要使用继电器即可；但如果需要调速，可以使用三极管，场效应管等开关元件实现PWM（脉冲宽度调制）调速。

(2) **性能：**对于PWM调速的电机驱动电路，主要有以下性能指标：

- 输出电流和电压范围，它决定着电路能驱动多大功率的电机；
- 效率，高的效率不仅意味着节省电源，也会减少驱动电路的发热。要提高电路的效率，可以从保证功率器件的开关工作状态和防止共态导通（H桥或推挽电路可能出现的一个问题，即两个功率器件同时导通使电源短路）入手；
- 对控制输入端的影响，功率电路对其输入端应有良好的信号隔离，防止有高电压大电流进入主控电路，这可以用高的输入阻抗或者光电耦合器实现隔离；
- 对电源的影响，共态导通可以引起电源电压的瞬间下降造成高频电源污染；大的电流可能导致地线电位浮动；
- 可靠性，电机驱动电路应该尽可能做到，无论加上何种控制信号，何种无源负载，电路都是安全的。

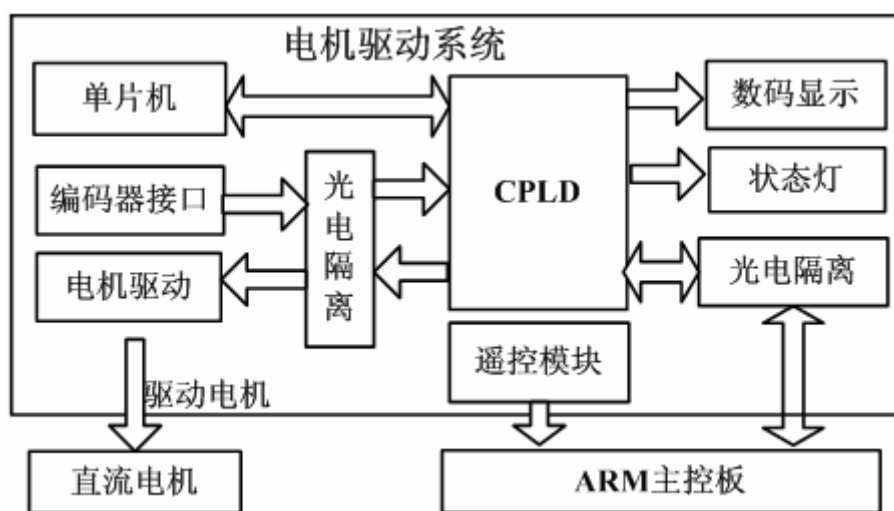


图 5-4 直流电机驱动硬件框图

### 5.3.2 直流电机驱动系统组成

在本课题中，移动机器人系统中选用直流电机。为了精确地控制电机，提高位置测量精

度,直流电机采用闭环控制方式。这个系统由以下几部分组成:无线遥控模块、电机驱动模块、位置信息反馈模块、通信模块和显示模块,如图 5-4 所示。直流电机控制包括调速和双向转动,电机通过 PWM 调速。电机驱动模块采用专用集成芯片 LM298 驱动。系统利用增量式脉冲编码器作为位置反馈传感器,其输出信号为两路正交的方波信号。系统中利用 CPLD 设计四倍频电路,对两路正交方波信号四倍频后,产生一路位置脉冲信号和一路方向信号,可直接送至单片机或 ARM 主控板系统进行数据处理。

### 5.3.3 无线遥控模块

在环境建模时,移动机器人要在人工引导下行走,所以系统中设计了无线遥控模块。采用 8 路带互锁的无线遥控开关模块传输信号,该模块有 11 个引脚,每个引脚功能如下表 5-2 所示。D0、D1、…、D7 的 8 路信号分别对应遥控端的 8 个按键。按下某一按键,对应的那路信号变为“1”,其他 7 路信号均为“0”。将 8 路信号接到 ARM 的 8 个通用 I/O 口,通过检测 8 路信号值就可以判断遥控的指令。表 5.1 介绍了遥控模块各引脚功能。

表 5.1 无线遥控开关模块引脚功能

引脚	功能	引脚	功能
1	VCC	7	D4（停止）
2	GND	8	D5（测距）
3	D0（前进）	9	D6（模式）
4	D1（后退）	10	D7（备用）
5	D2（左转）	11	VT（保留）
6	D3（右转）		

在表 5.1 中, 标出了单片机每个信号线对应的命令。如 D0 对应前进、D4 对应停止。在环境建模时移动机器人需要测量基点的相对坐标, 所以在此设置了测距命令。模式切换命令是用来切换移动机器人自动/手动两种运动模式的。无线遥控模块接口电路如图 5-5 所示。

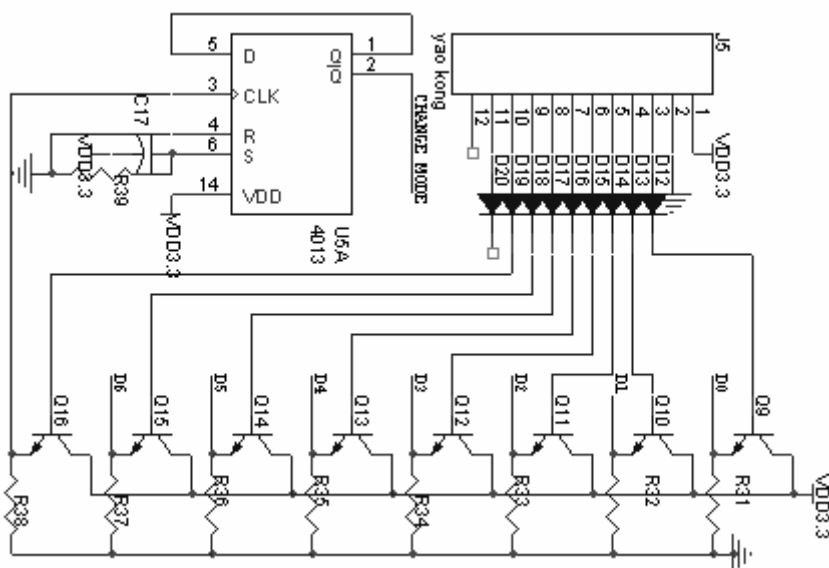


图 5-5 无线遥控模块接口电路

### 5.3.4 直流电机驱动模块

直流电机驱动模块包括两部分：PWM 产生电路和直流电机驱动电路。

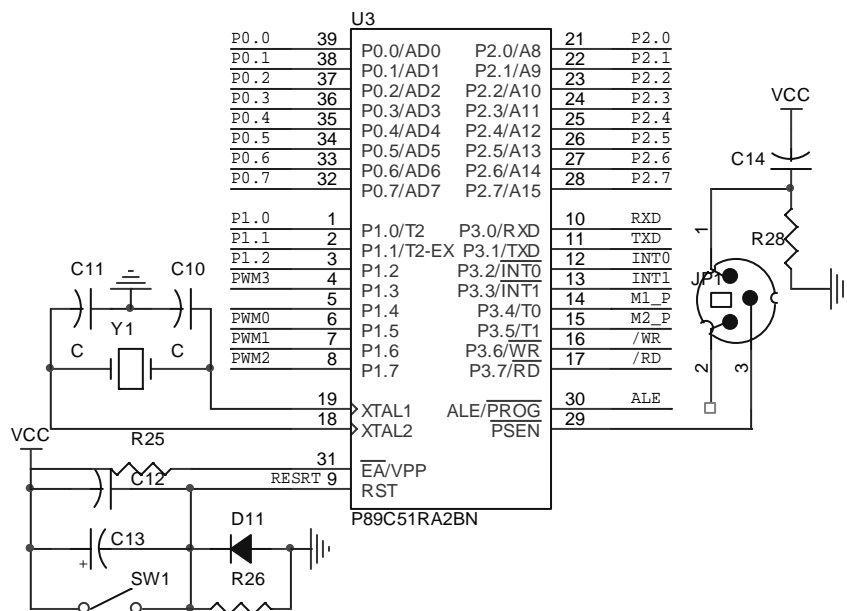


图 5-6 P89C51RA2BN 应用电路图

直流电机采用PWM调速，方向由单片机I/O端口控制。将一路PWM信号分别与两路方向控制信号“逻辑与”后得到两路PWM信号，这两路信号作为直流电机的调速、控制方向的信号。系统选用自带PWM脉宽调制模块的飞利浦P89C51RA2BN系列单片机，如图5-6所示，单片机P1.5（PWM0）、P1.6（PWM1）输出两路PWM波，P2.0~P2.3四个I/O口作为两个直流电机的方向控制信号，此六路信号经调制后产生四路PWM信号，用来控制两直流电机。P1.5，P2.0和P2.1控制一个直流电机，P1.5输出PWM波用于电机调速，P2.0和P2.1用于控制方向。当P2.0为“1”且P2.1为“0”时，电机正转；P2.0为“0”且P2.1为“1”时，电机反转；当两者相同，电机停止。六路信号经过CPLD中的PWM波产生模块后被调制为四路PWM波分别控制两路电机，底层Block Diagram/Schematic File图表模块如图5-7所示，PWM波形调制仿真图见图5-8。

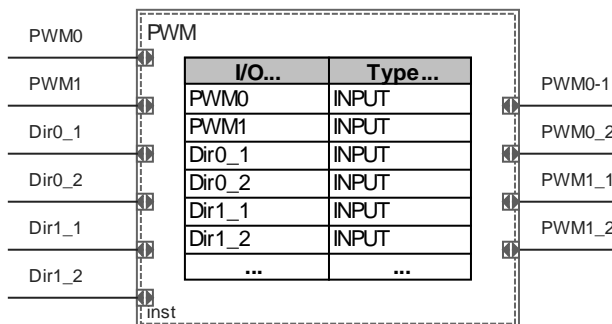


图5-7 PWM波调制图表模块

如果直接用ARM主控板系统PWM端口和方向控制I/O口控制电机，那么系统的实时性无疑更好。系统上提供另外一种产生PWM波方式，利用ARM板上的P0.7（PWM2），P0.21（PWM5）引脚输出两路PWM波，通用I/O引脚P2.0、P2.1、P2.2、P2.3输出方向来控制两个

直流电机的速度和方向。控制电机的PWM波来源于单片机还是来源于ARM是由跳线选择的。值得注意的是，CPLD的电源为5V，而ARM主控板系统I/O口电压为3.3V，所以，ARM的控制信号和CPLDI/O口连接时需要光电隔离。如图5-9所示，

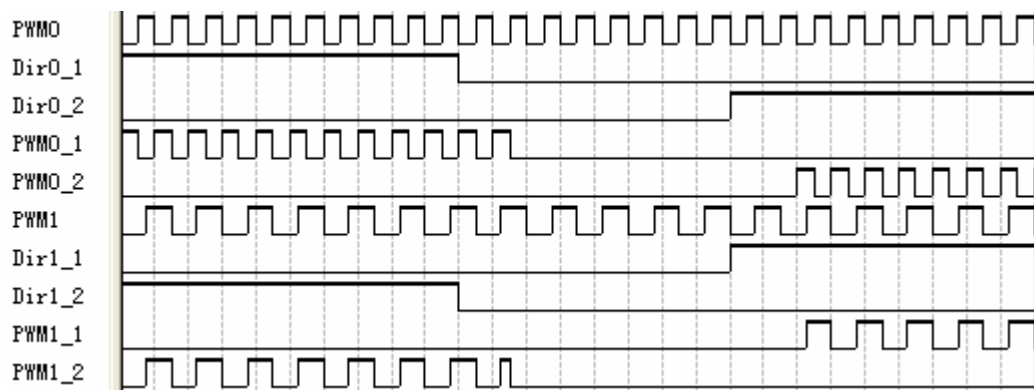


图5-8 PWM调制波形图

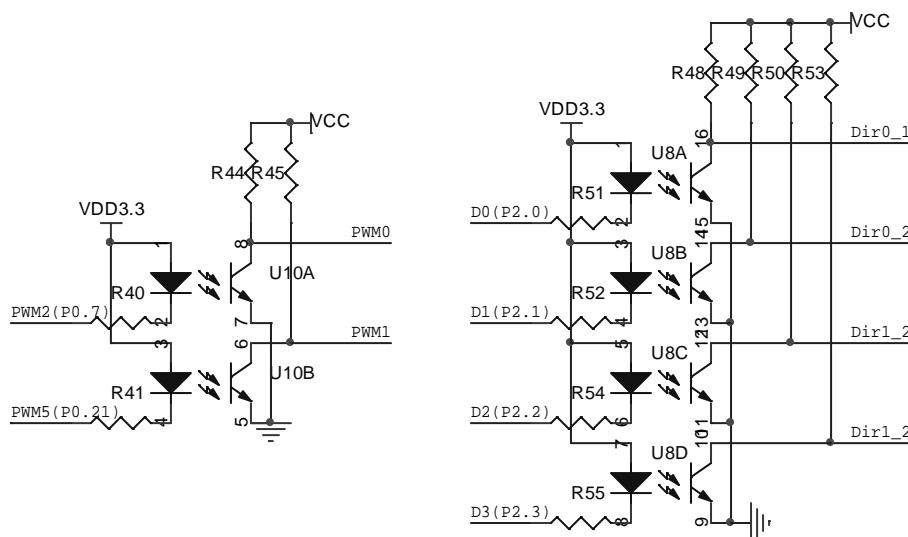


图5-9 光电隔离电路

由于单片机或 ARM 本身就带有 PWM 输出口，直接输出控制信号即可，无须另加电路。不过，其输出的 PWM 波功率有限，须由驱动电路放大后才能驱动电机。直流电机的 PWM 驱动往往采用 H 桥电路，对于小于 2A 左右的 PWM 驱动建议使用可以使用 L298, L292 等集成器件。为适应小型直流电动机的使用需要，各国半导体厂商纷纷推出了大量的直流电动机控制专用集成电路。其中 L290/L291/L292/L298 几种专用集成电路是 SGS-THOMSON 公司为直流电动机控制而专门设计的，利用它们可以构成基于微处理器控制的直流电机伺服系统，并具有快速、精确、高效、低功耗等特点，可方便地与微机直接交互。另外，这三种芯片不但可以共同构成直流电机伺服控制系统，同时也可以单独使用。

在我们系统中使用 L298 集成芯片组成电机驱动电路，L298 是恒压恒流双 H 桥集成电机芯片，可同时控制两个电机，且输出电流可达到 2A。如图 5-10 所示，L298 的 ENA（第 6 引脚）、EN B（第 11 引脚）均接高电平，四个输入脚（第 5、7、10、12 引脚）分别与四路调制的 PWM 信号相连。SENSE A，SENSE B 为电流反馈引脚。电机控制方向引脚如表 5.2 所示。Vss 电压最小为 4.5V，最大可达 36V；Vs 电压最大值也是 36V。但经过实验，Vs

电压应该比  $V_{SS}$  电压高，否则有时会出现失控现象。其应用电路如图 5-11 所示。

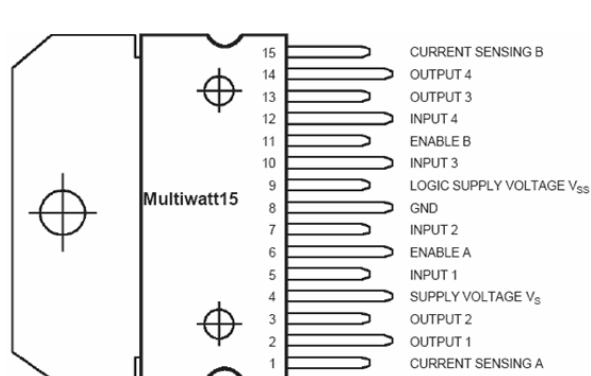


图 5-10 L298 引脚图

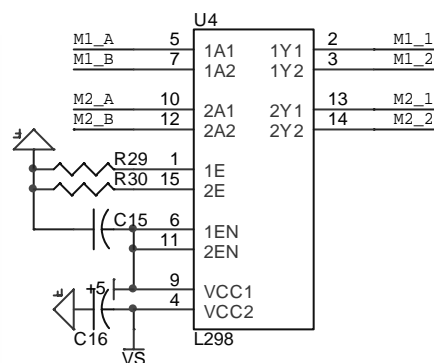


图 5-11 L298 应用电路

表 5.2 L298 控制引脚使能逻辑关系

ENA (B)	IN1 (3)	IN2 (4)	电机运转情况
H	H	L	正转
H	L	H	反转
H	同 IN2 (4)	同 IN1 (3)	快速停止
L	X	X	停止

### 5.3.5 位置信息反馈模块

增量式光电编码器（以下简称编码器）是一种新型的脉冲式伺服元件，可以直接将角位移转变成脉冲信号，用于检测被测对象的运动方向、运动位移、旋转速度等。在电机伺服数字控制领域得到广泛的应用。增量式光电编码器输出如图 5-12 所示的 A 相、B 相和 Z 相三个信号。A、B 相是两个正交脉冲信号，Z 相为零位脉冲信号，每转一周输出一个脉冲。A、B 两相信号的脉冲数标志码盘所转过角度。根据 A 相和 B 相两组信号的相位来判断转动方向，即当 A 相超前 B 相时，标志码盘正转，当 B 相超前 A 相时，码盘反转。对 A、B 输出脉冲进行计数才能转化为相对位置。

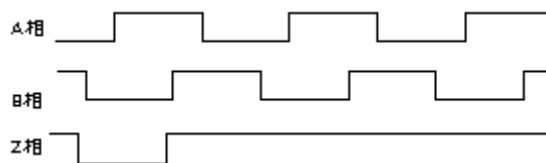


图 5-12 编码器输出信号

在实际应用中，通常采用四倍频的方法以提高光电码盘的定位精度。因此，结构简单、性能稳定、运行可靠的四倍频电路，是电机伺服电路的一个重要组成部分。通常，光电码盘的四倍频电路与判向电路设计为一个整体，故又统称为四倍频及判向电路。四倍频后的码盘信号，需经计数器计数后，才能转化为相对位置。计数过程一般有两种实现方法：一是由可编程计数器或微处理器内部定时计数器 0 实现计数；二是由可逆计数器实现对正反向脉冲的计数。当需控制的电机数量少时，前一方案附加元件少，结构简单，较为容易实现。在我们设计的系统中由于仅有两部电机，所以使用第一种方案。设计一种四倍频及判向电路，将 A、B 相信号，转变为一路脉冲信号和一路方向信号。方向信号直接接到单片机 I/O 口，利用单片机中的定时器对脉冲计数。

随着数字电路设计复杂程度越来越高,用传统画原理图的方法来进行设计,其可行性将越来越受到挑战,即使设计成功,其设计的效率也将大打折扣,设计验证、仿真等工作将难以准确地进行,所以用硬件描述语言(HDL)来表达设计意图、CPLD/FPGA 作为硬件载体、计算机为设计开发工具、EDA 软件作为开发环境已越来越为广大电子设计者所迫切需要掌握的方法。本课题以 QUARTUS II 5.0 为硬件开发 EDA 环境,用 VHDL 硬件描述语言对 ALTERA 公司的 MAX7000S 系列 EMP7128SLC84 进行了正交编码信号四倍频的电路的设计。

整个设计开发,大致可分为三个基本步骤:底层的设计用 VHDL 语言进行设计输入,设计仿真和最终在器件上进行设计实现。在实际开发中,这些步骤可以重复或交叉进行,直到设计结果达到预期目标为止。

### (1) 设计的输入

下面给出对底层的一部分功能进行 Block Diagram/Schematic File 图表模块。如图 5-13 所示,74LS174 为 6D 触发器,用于锁存 A、B 相信号的当前状态及原状态;CLK 为 74LS174 的同步时钟,其周期至少应小于码盘脉冲最小周期的 1/4;D0 及 D1 分别为电路生成的正反向四倍频计数脉冲,其宽度等于 CLK 的脉冲周期。该电路的逻辑表达式如图 5-13 所示。

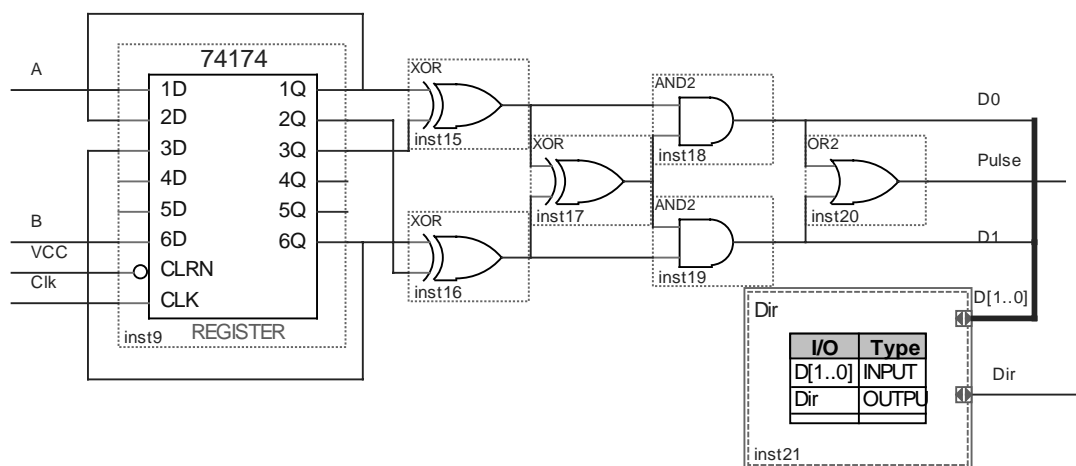


图 5-13 面向通用计数器的四倍频及判向电路

以下是 Dir Block 模块中的 VHDL 语言描述:

```
LIBRARY ieee;
USE ieee.std_logic_1164.all;
USE ieee.std_logic_unsigned.all;

-- Entity Declaration

ENTITY Dir IS
    -- {{ALTERA_IO_BEGIN}} DO NOT REMOVE THIS LINE!
    PORT
    (
        D : IN STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
        Dir : OUT STD_LOGIC
    );
    -- {{ALTERA_IO_END}} DO NOT REMOVE THIS LINE!
```

```

END Dir;

-- Architecture Body

ARCHITECTURE Dir_architecture OF Dir IS
SIGNAL Direct_reg:STD_LOGIC;

BEGIN

PROCESS(D)
BEGIN
    IF(D = "01") THEN
        Direct_reg <= '1';
    ELSIF(D = "10") THEN
        Direct_reg <= '0';
    ELSE
        Direct_reg <= Direct_reg;
    END IF;
    Dir <= Direct_reg;
END PROCESS;
END Dir_architecture;

```

### (2) 设计仿真

在编译通过以后,只表明所设计的项目建立了一个编程文件,但还不能保证该设计在各种可能的情况下都有正确的响应,因而还必须用 QUARTUS II 5.0 的 Simulator 仿真器和 Timing Analyzer 工具分别进行功能和时序的仿真,以验证设计是否完全符合要求。图 5-14 给出时序仿真及功能仿真的图。

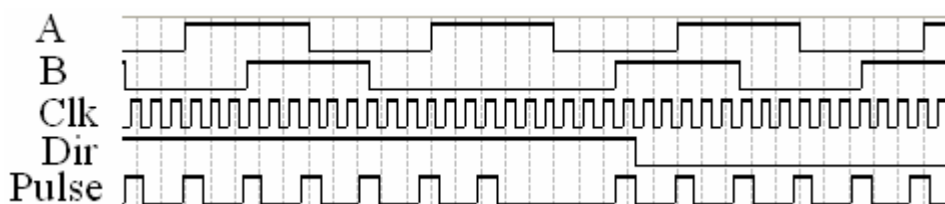


图 5-14 正交脉冲四倍频辨向时序仿真图

### (3) 设计实现

在进行完每个模块的图表模块或 VHDL 输入、编译综合、和仿真之后,确认时序满足设计要求,就需要对设计进行实现了。即通过 QUARTUS II 5.0 编程器 Programmer 的配置 Configure 命令,编译器自动产生的 EPROM 目标文件(\*.pof),经过 ByteBlaster 下载电缆,下载配置到 EMP7128SLC84 中,从而完成设计。

上面将编码器正交脉冲信号转变成一路方向信号和一路脉冲信号。在设计中应注意以下几个问题:(1)由于输入信号至少必须稳定三个时钟周期后数字滤波器(74LS174)才能有效输出,所以 A 或 B 通道的信号脉冲宽度(高电平或低电平)必须大于 3 个时钟周期。一个实际的设计方案还得考虑波形的上升和下降沿时间、波形的不对称性及控制现场的噪声的存



在, 因此, A 和 B 信号的周期应远大于 3 倍时钟周期, 以保证三位延迟滤波器进行可靠地采样。实践表明该电路时钟可达 20MHz, A 和 B 频率可达 1MHz 以上。(2)一个正交状态由两个通道信号的状态确定, 设计者应保证两个输入信号有标准  $90^\circ$  相位差。

系统中两部电机需要两个编码器, 将产生四路信号。将这四路信号直接送到单片机的两个定时器 (T0、T1) 口两个方向判断 I/O 口, 便可以计算出位置信息。系统中还同光电隔离将四路位置信号送入 ARM 主控板系统, 同样利用定时器和通用 I/O 端口来计算位置信息。

### 5.3.6 其他模块

为了充分利用 CPLD 资源, CPLD 中又扩展了显示模块, 如图 5-15 所示。该模块用于地址译码和数字译码。此外, 还有用于显示方向的方向指示灯。

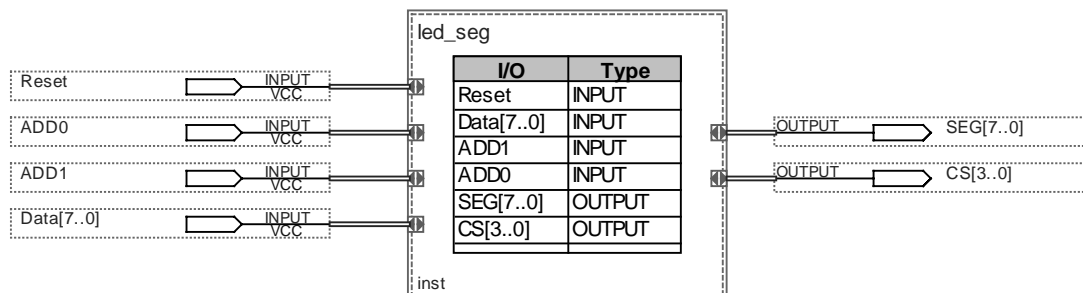


图 5-15 数码管显示译码模块

## 5.4 完全遍历系统控制流程

以上介绍了移动机器人完全遍历系统的硬件结构, 包括主控板系统、环境感知系统和电机驱动系统。这一节主要研究该完全遍历系统的控制算法。

### 5.4.1 各系统功能

主控板系统是整个系统的控制中心, 主要完成遍历算法的实现。具体说, 有以下几个功能:

(1) 接收遥控命令, 在人工引导下完成移动机器人对环境的“沿边”学习。这个过程中, 人工控制机器人移动方向, 当移动机器人到达特定位置 (基点处) 时自主停下。移动机器人是依靠脉冲编码器反馈的距离信息来识别基点; 当移动机器人位于基点处时, 自主调整自身方位, 使之指向地磁场 N 极。接着, 接收环境感知系统上传的距离信息, 对局部区域建模, 并更新环境电子地图; “沿边”学习过程就是建立环境四周基点的信息和初步建立环境电子地图;

(2) “沿边”学习后, 人工引导移动机器人至遍历起始基点附近, 以后移动机器人自主完成环境遍历。首先, 微调自身位置找到起始基点, 接着完成该局部区域遍历。

(3) 移动机器人到达某未遍历基点处, 首先要对环境学习, 识别当前局部区域环境形状, 找到与之对应的匹配地图 (见第三章), 确定该局部区域遍历的模式, 并更新环境电子地图; 接着, 依据环境电子地图信息完成局部区域遍历。这个过程主控板系统要控制电机驱动系统完成以下三个任务: 寻找遍历起始点、局部区域往复遍历和基点回归;

(4) 不断搜索未遍历区域基点并完成对应局部区域遍历, 直到完成整个环境遍历。

环境感知系统是用来识别局部环境信息, 为环境建模提供必要的信息。环境感知系统需要采集八路超声波测量的距离值, 八路红外线传感器的状态值和地磁场传感器测量的方位值。环境感知系统中的传感器作用如下:

(1) 地磁场传感器用于移动机器人定位。一方面和超声波传感器配合使用进行环境建模; 另一方面和脉冲编码器配合控制电机直线行走;

(2) 超声波传感器除了(1)中提到的作用外, 还用于感知环境形状, 确定局部区域遍历的模式。在局部区域遍历中和红外线传感器共同作用, 用来选择局部区域遍历模板;

(3) 红外线主要用于移动机器人在移动过程中检测障碍物。

电机控制系统是用来驱动移动机器人行走, 是完全遍历算法实现的物质载体。该系统接收主控板系统的命令驱动移动机器人行走并将系统检测的位置移动信息及时反馈给主控板系统。

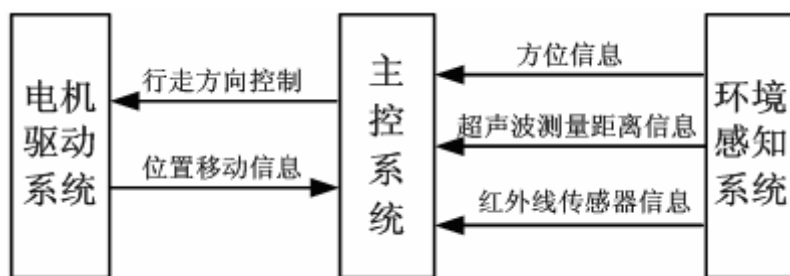


图 5-16 系统间通信信息示意图

#### 5.4.2 系统间的信息接口

通过上一节介绍的各系统功能, 可以清楚地看到主控板系统与环境感知系统间要传递方位信息、超声波测量的距离信息和红外线传感器状态信息, 主控板系统和电机驱动系统之间要传递电机旋转方向信息和位置移动反馈信息, 如图 5-16 所示。

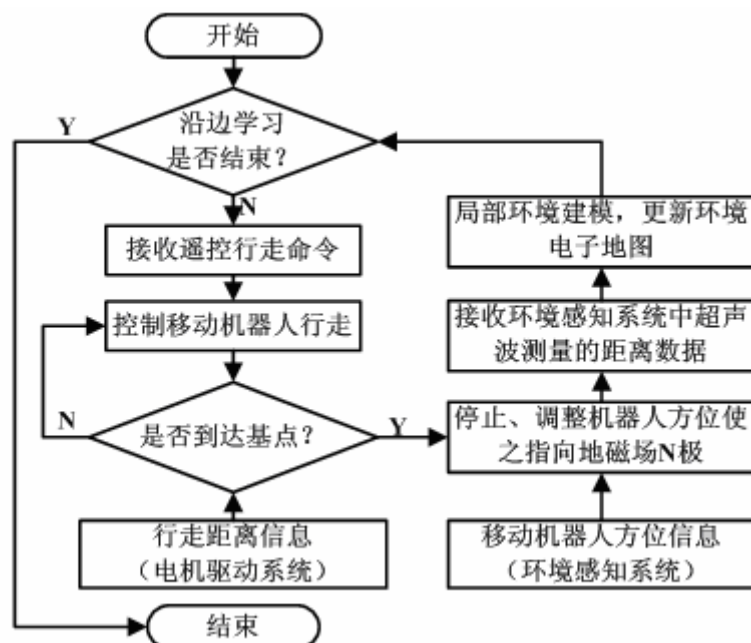


图 5-17 “沿边”学习流程图

### 5.4.3 系统控制流程

整个系统控制分两部分：沿边学习和完全遍历。沿边学习控制流程如图 5-17 所示，完全遍历流程如图 5-18 所示。在完全遍历算法中局部区域遍历算法相对复杂，其算法流程如图 5-19 所示。

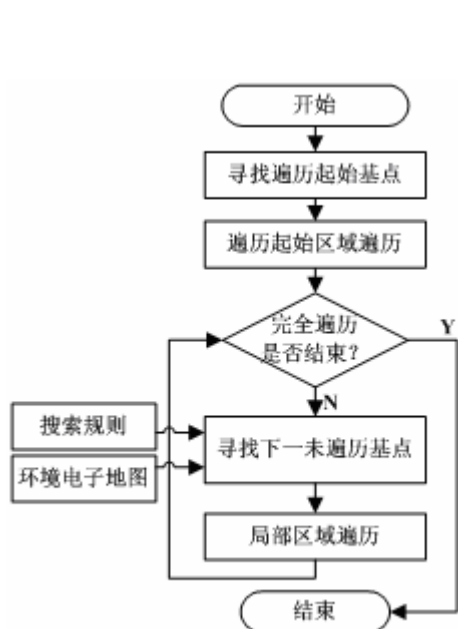


图 5-18 完全遍历算法流程图

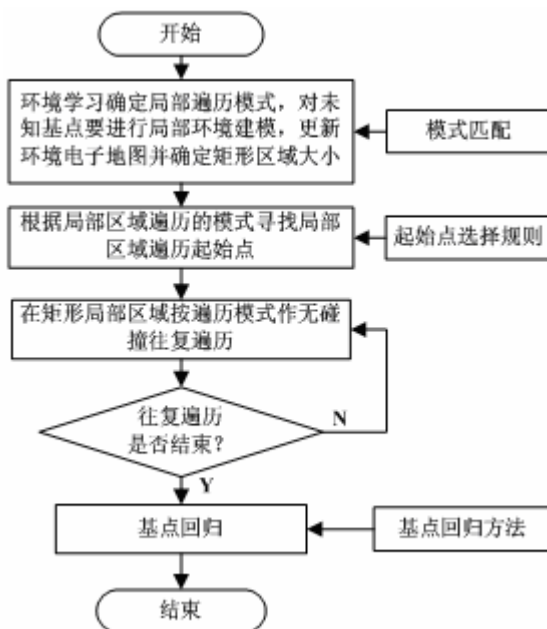


图 5-19 局部区域遍历算法流程图

## 5.5 本章小结

该完全遍历硬件系统由三个子系统组成：ARM 系统、电机驱动系统和环境感知系统。在前一章节中，已经详细地介绍了环境感知系统。本章首先介绍整个完全遍历系统硬件组成，分析了三个系统之间的通信关系；接着依次介绍了 ARM 主控板系统和电机驱动系统；介绍了 ARM 主控板系统上的串行通信模块、PWM 模块、A/D 转换器模块等，电机驱动系统包括电机驱动模块和位置反馈模块；最后，介绍了完全遍历系统的控制流程。

## 第六章 总结与展望

### 6.1 总结

随着社会信息化的深入发展,智能移动机器人逐渐成为人们生产实践中的迫切需要。本论文结合当前室内移动机器人研究热点课题“完全遍历路径规划”,对移动机器人环境建模和完全遍历路径规划相关问题进行了深入研究。在调研移动机器人环境建模和路径规划最新发展动态的基础上,论文从栅格法和拓扑法环境建模角度,先后提出了基于栅格法和拓扑法的矩形环境建模法和基于该建模方法完全遍历路径规划,就传感器建模、环境感知技术和机器人定位技术等问题进行了深入的研究。本论文的主要研究内容及创新性工作总结如下:

1. 提出了一种实用的基于栅格法和拓扑法的环境建模方法——矩形分解法。首先,分析了当前环境建模的几种典型方法:栅格法、几何法、拓扑法等,阐述了这几种方法的优缺点。在此基础上,提出了矩形环境建模方法。该环境建模方法简单有效,能够对未知环境建模,特别适应于室内完全遍历路径规划的环境建模。信息存储量很小,克服了栅格法环境信息存储量大的困难,避免栅格法的全局定位;建立全局交错网络远比建立拓扑网络简单。

2. 提出了一种基于矩形建模方法的完全遍历路径规划,完全遍历路径规划分为全局路径规划层和局部路径规划层。全局层次上是基于规则的路径规划,局部层是基于模板法的遍历路径规划。该遍历路径规划方法简单实用,效率很高。

3. 研制了一种面向移动机器人的嵌入式环境感知系统。首先,调研和分析了目前移动机器人常用传感器系统的类型和特点,阐述了“环境感知系统”的概念,在此基础上,研制开发了一种面向移动机器人的嵌入式环境感知系统,集成多路红外传感器、多路超声波传感器和地磁场传感器。实际应用表明,本嵌入式环境感知系统成本低、性价比高,具有很好的兼容性,能满足大多数移动机器人环境感知的需要。

4. 研制闭环电机控制系统,包括电机驱动和位置反馈两部分。位置反馈传感器采用光电脉冲编码器,正交信号经驱动系统上的四分频判向电路处理后生成一路脉冲信号和一路方向信号。这两路信号可直接送入单片机处理,计算出位置。系统上还设计了遥控模块,可人工引导移动机器“沿边”学习。此外,电机驱动模块除了受单片机控制外,还可以由ARM主控板系统控制。

### 6.2 展望

以上概括和总结了本论文的主要工作和结论。在此基础上,可从以下几方面作进一步的研究:

1. 进一步探讨传感器技术与移动机器人环境建模相结合的问题,特别是对未知环境的环境建模问题,如何利用有效的、简单的数据结构知识表示环境。给出更具一般性、更具实用价值的环境建模理论。

2. 开发研制性能更好的嵌入式环境感知系统,并从系统论角度来处理多传感器的集成与控制问题。如何实现多传感器信息的有效融合与集成问题,如何有效地表征传感器信息的不确定性,并给出鲁棒性好的信息处理方法是下一步研究的重点。

3. 移动机器人自主环境建模,尤其在动态不确定环境下的环境感知与建模问题,是需

要进一步深入研究的课题。如何解决好环境建模过程中的自定位问题(即SLAM问题),是当前移动机器人研究中的难点问题之一,目前仍处于摸索探讨阶段,需要进一步深入研究。

4. 结合环境建模方法,在现有的完全遍历路径规划方法基础上,综合多种方法深入研究完全遍历路径规划问题;将本论文提出的完全遍历路径规划方法进一步完善,降低完全遍历路径规划的重复率。

## 致 谢

时光飞逝，转眼间近三年的硕士生活即将结束。在毕业完成之际，首先向为本篇论文提供过支持和帮助的老师、同学、亲友表示衷心的感谢和深深的敬意。

本论文是在导师张赤斌副教授的悉心关怀与指导下完成的。在作者攻读硕士期间，得到了导师自始至终的关怀和指导。论文从确定方向、选题、研究、仿真实验、论文框架、成文以及修改等各个环节，导师都给予了认真的指导；导师不仅在学习和工作中给予作者细心的关怀和指导，而且在生活上也给予了极大的理解和关心，他是作者学习和工作中的良师，是生活中的益友；导师渊博的知识、敏锐的洞察力、活跃的学术思想、严谨的治学态度、忘我的工作精神、踏实无华的为人和献身科学的精神深深地感染着作者，是作者学习的榜样、前进的动力。作者将牢牢铭记导师的谆谆教诲，在以后的科研道路上扬鞭奋蹄，创出佳绩，不辜负导师的殷殷期望。在此，谨向导师表示最崇高的敬意和最衷心的感谢！

感谢与我朝夕相处实验室的师弟们，特别是顾磊，徐伟梁等同学给予的支持和帮助，同时要感谢毛玉良老师，何小兵、陈锋、吴洲等同学的大力支持！跟大家相处的这段岁月是我人生中难忘的一段美好时光，非常留恋和大家共同学习和生活的这段岁月。

谨以此文奉献给我的父母，感谢他们多年来的养育之恩。正是他们的无私帮助和支持，我才能全身心地投入到学习和研究中去，顺利完成学业如期完成论文工作。我的论文中包含着他们为我安心求学所付出的艰辛和劳苦。

谨以本文献给所有关心、支持和帮助我的师长、亲人和朋友们。

研究生：刘奎

2006/02

## 参考文献

- 1 Nilsson N. A mobile automation: an application of artificial intelligence techniques[C]. In Proc. IJCAI, 1969
- 2 李磊, 叶涛等. 移动机器人技术研究现状与未来[J]. 机器人, 2002, 24(5): 475-480
- 3 徐国华, 谭民. 移动机器人的发展现状及趋势[J]. 机器人技术与应用, 2001, (3): 7-14
- 4 卢韶芳, 刘大维. 自主式移动机器人导航研究现状及其相关技术[J]. 农业机械学报, 2002, 33(2): 112-116
- 5 E. Prassler, A. Pitter, C. Schaeffer, P. Fiorini. A short history of cleaning robots[J]. Autonomous Robots, 2000, 9(3): 211-226
- 6 F. Yasutomi, D. Takaoka, M. Yamada, K. Tsukamoto. Cleaning robot control[C]. In Proc. of IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation, Philadelphia, USA, 1988: 1839-1841
- 7 R. D. Schraft, U. Brauning, T. Orlowski, M. Hornemann. Automated cleaning of windows on standard facades[J]. Automation in Construction, 2000, 9(5-6): 489-501
- 8 K. Kamiya, S. Iida, T. Koyama, et al. Vehicle control for clean room mobile robot[C]. In Proc. Of Intl. Robots and Vision Con. Detroit, USA, 1997: 1-15
- 9 D. C. MacKenzie, T. R. Baelh. Making a clean sweep: Behavior based vacuuming[J]. In Proc. of AAAI Fall Symp. on Instantiating Real-World Agents, Raleigh, USA, 1993: 93-98
- 10 C. M. Luo. Neural Dynamics and Computation for Complete Coverage Path Planning of Mobile Cleaning Robots[D]. MSC thesis, The Faculty of Engineering of the University of Guelph, 2002
- 11 J. Latombe, Robot Motion Planning[M]. Norwell, MA: Kluwer, 1991
- 12 Y. Koren, J. Borenstein, Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation[C]. In Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation, Sacramento, CA, 1991 (7-12): 1398-1404
- 13 J. H. Chuang, N. Ahuja, An analytically tractable potential field model of free space and its application in obstacle avoidance[J]. IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. B, 1998 (28): 729-736
- 14 E. Rimon, D. E. Koditschek, Exact robot navigation using artificial potential functions[J]. IEEE Trans. Robot. Automat., 1992 (8): 501-518
- 15 O. Khatib, Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[J]. Int. J. Robot. Res., 1986, vol. 5, no. 1: 90-98
- 16 K. S. AlSultan, M. D. S. Aliyu. A new potential field-based algorithm for path planning[J]. J. Intell. Robot. Syst., 1996, vol. 17. no. 3: 265-282
- 17 J. Guldner, V. I. Utkin. Sliding mode control for gradient tracking and robot navigation using artificial potential fields[J]. IEEE Trans. Robot. Automat., 1995 (11): 247-254
- 18 P. Veelaert, W. Bogaerts. Ultrasonic potential field sensor for obstacle avoidance[J]. IEEE Trans. Robot. Automat., vol. 15, pp. 774-779, Aug. 1999
- 19 J. Borenstein, Y. Koren. Real-time obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1989, vol. 19, no. 5: 1179-11870
- 20 J. Borenstein, J. Koren. Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots in cluttered

- environments[C]. In Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation, 1990: 572-577
- 21 张祺, 杨宜民. 基于改进人工势场法的足球机器人避碰控制[J]. 机器人, 2002, 24(1): 12-15
- 22 高云峰, 黄海. 复杂环境下基于势场原理的路径规划方法机器人[J]. 机器人, 2004, 26(2): 114-118
- 23 M. Kondo, K. Kimura. Collision avoidance using a free space enumeration method based on grid expansion[J]. Advanced Robotics, 1989, 3(3): 159-175
- 24 马兆青, 曾任. 基于栅格方法的移动机器人实时导航和避障机器人[J]. 机器人, 1996, 18(6): 344-348
- 25 P. Trahanias. Visual Recognition of Workspace Landmarks for Topological Navigation [J]. Autonomous Robotics, 1999, 7(2): 143-158
- 26 D. Avis, B. K. Bhattacharya. Algorithms for Computing d-dimensional Voronoi Diagrams and Their Duals[J]. Advances in Computing Research. 1983 (1): 159-180
- 27 H. Choset, K. Nagatani, A. Rizzi. Sensor based planning: Using a honing strategy and local map method to implement the generalized Voronoi graph[C]. In Proc. SPIE Conf. Systems and Manufacturing, 1997
- 28 C. G. Zhang, Y. G. Xi. Robot rolling path planning based on locally detected information [J]. ACTA Automation sinica, 2003, 29(1): 38-44
- 29 张纯刚, 席裕庚. 动态未知环境中移动机器人的滚动路径规划及安全性分析[J]. 控制理论与应用, 2003, 20(1): 37-44
- 30 张纯刚, 席裕庚. 全局环境未知时基于滚动窗口的多机器人路径规划[J]. 中国科学(E辑), 2001, 31(1): 51-58
- 31 张纯刚, 席裕庚. 基于滚动窗口的多机器人路径协调规划[J]. 模式识别与人工智能, 2002, 15(1): 1-5
- 32 张纯刚, 席裕庚. 一类动态不确定环境下机器人的滚动路径规划[J]. 自动化学报, 2002, 25(2): 1-15
- 33 K. Sugibara, J. Smith. Genetical algorithms for adaptive motion planning of an autonomous mobile robot[C]. Problems IEEE Trans SMC. USA: SIM, 1997
- 34 孟庆浩等. 基于 Q-M 图启发式搜索的移动机器人全局路径规划. 机器人[J], 1998, 20(4): 274-276
- 35 仲欣, 吕恬生. 基于遗传算法的汽车式移动机器人路径规划方法[J]. 上海交通大学学报, 1999, 33(7): 32-35
- 36 J. S. Oh, J. B. Park, Y. H. Choi. Complete coverage navigation of clean robot based on triangular cell map[C]. In Proceedings of IEEE Intl. Symp. on Industrial Electronics, Pusan, South Korea, 2001: 2089-2093
- 37 P. N. Atkar, H. Choset, A. A. Rizzi, et al. Exact cellular decomposition of closed orientable surfaces embedded in  $R^3$  [C]. In Proc. Of IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation. Seoul. Korea. 2001: 699-704
- 38 R. N. D. Carvalho, H. A. Vidal, P. Vieira, et al. Complete coverage path planning and guidance for cleaning robots[C]. In Proc. Of the IEEE Intl. Symp. On Industrial Electronics. Guimaraes, Portugal, 1997: 677-682
- 39 Simon X. Yang, Chaomin Luo. A Neural Network Approach to Complete Coverage Path Planning[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2004, vol. 34, no. 1: 718-724
- 40 T. W. Waneck. Fuzzy guidance controller for an autonomous boat[J]. In Proceedings of the IEEE Control and Systems, 1997, vol. 17, no. 2
- 41 M. Trivedi et al. Developing Robotic Systems with Multiple Sensors[J]. IEEE Trans. SMC,



- 1990, 20(12): 1258-1299
- 42 朱世强, 工宣银. 机器人技术及其应用[C]. 浙江大学出版社, 2001.
- 43 蔡自兴, 邹小兵. 移动机器人环境认知理论与技术的研究[J]. 机器人, 2004, 26(1): 87-91
- 44 迟健男, 徐心和. 移动机器人即时定位与地图创建问题研究[J], 机器人, 2004, 26(1): 92-96
- 45 罗荣华, 洪炳铭. 移动机器人同时定位与地图创建研究进展[J], 2004, 26(2): 182-186
- 46 A. Elfes. Robot Navigation: Integrating Perception, Environmental Constraints and Task Execution Within a Probabilistic Framework[J]. In Proceeding of the International Workshop of RUR, 1995: 93-130
- 47 H. Choset. Coverage of known spaces: the boustrophedon cellular decomposition[J]. Autonomous Robots, 2000, 9(3): 247-253
- 48 H. Choset, Pignon H. Coverage path planning: the boustrophedon cellular decomposition [C]. In: Intl. Conf. on Field and Service Robotics, Canberra, Australia, 1997
- 49 A. Zelinsky, R. A. Jarvis, J. C. Byrne, et al. Planning paths of complete coverage of an unstructured environment by a mobile robot[J]. in Proc. ICAR, 1993: 533-538
- 50 E. Garcia, P. Gonzalez de Santos. Mobile-robot navigation with complete coverage of unstructured environments[J]. Robotics and Autonomous Systems 2004 (46) : 195-204
- 51 G. Dudek, M. Jenkin. Computational principles of mobile robotics[J]. Cambridge Univ Press, 2000: 132-145
- 52 Lozano-Perez T. Automatic planning of manipulator transfer movement[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1981, 11(10): 681-698
- 53 Lozano-Perez T. Spatial planning: A configuration space approach[J]. IEEE Trans on Computers, 1983, 32(2): 108-120
- 54 J. Crowley. Mathematical Foundations of Navigation and Perception for an Autonomous Mobile Robot[J]. In Proceeding of the International Workshop of RUR, 1995: 9-51
- 55 S. Thurn. Learning Metric-topological Maps for Indoor Mobile Robot Navigation[J]. Artificial Intelligence, 1998: 21-71
- 56 王卫华, 陈卫东等. 基于不确定信息的移动机器人地图创建研究进展. 机器人, 2001, 6(11): 563-568
- 57 Konolige. A Refined Method for Occupancy Grid Interpretation[J]. In Proceeding of the International Workshop of RUR, 1995: 338-352
- 58 A. Elfes. Sonar-Based Real-World Mapping and Navigation[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987(3): 249-265
- 59 E. Fabrizi, A. Saffioti. Extracting Topology-Based Maps from Gridmaps[C]. In Proc. Of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation(ICRA), 2000 (29) 72-2978
- 60 J. Kim, R. Pearce, N. Amato. Robust Geometric-Based Localization in Indoor Environments Using Sonar Range Sensors[C]. In Proc. Of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems(IROS), 2002: 421-426
- 61 T. Duckett, U. Nehmzow. Knowing your Place in Real World Environments. In: Proceeding of 3<sup>rd</sup> a European Workshop on Advanced Mobile Robots, 1999: 135-142
- 62 朱森庆, 杨建刚等. 自主式智能系统[J]. 浙江大学出版社, 2000
- 63 Brooks R A. Solving the Find-path problem by good representation of free space[J]. IEEE Trans on Sys Man and Cybern, 1983, 13(3): 190-197

- 64 Chatila R. Path Planning and Environment Learning in a Mobile Robot System[C]. Proc of the European Conf on AI, 1982
- 65 Habib M. K, Asama H. Efficient method to generate collision free path for autonomous mobile robot based on new free space structuring approach[C]. Proc. IEEE/RSJ IROS, 1991: 563-567
- 66 T. Duckett, U. Nehmzow. Experiments in Evidence-Based Localization for a Mobile Robot[C]. In: Proceeding of the AISB Workshop on Spatial Reasoning in Mobile Robots and Animals, 1997: 245-255
- 67 Hwang Y K, Ahuja N. A potential field approach to path planning[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1992, 8(1): 23-32
- 68 P. Jensfelt, D. Austin, O. Wilk, et al. Feature Based Consideration for Mobile Robot Localization[J]. In: Proceeding of the IEEE ICRA, 2000: 2531-2537
- 69 A. Makarenko, S. Williams, F. Bourgault, et al. An Experiment in Integrate Exploration[J]. In: Proceeding of the IEEE IROS, 2002: 534-539.
- 70 国家 863 计划智能机器人专家组. 机器人博览. 中国科学技术出版社[J], 2001
- 71 庄晓东, 孟庆春. 动态环境中基于模糊概念的机器人路径搜索方法[J]. 机器人, 2001, 23(5): 397-399
- 72 李瑞峰, 李伟招. 基于多传感器信息融合的移动机器人路径规划[J]. 机电一体化, 2002, (4): 20-23
- 73 Nelson H C, Yung Cang Ye. An Intelligent Mobile Vehicle Navigator Based on Fuzzy Logic and Reinforcement Learning [J]. IEEE Trans on Sys Man and Cybern. Part B: Cyberneics, 1999, 29(2): 314-320
- 74 Gerke M. Genetic Path Planning for Mobile Robots[C]. Proc of American control conference. San Diego, CA, USA, 1999: 596-601
- 75 李强, 林良明等. 基于进化的移动机器人路径规划方法[C]. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> world congress on intelligent control and automation. Hefei, China, 2000, 28(2): 1206-1209
- 76 刘雁飞, 裘聿皇. 基于两层编码遗传算法的机器人路径规划[J]. 控制理论与应用, 2000, 17(3): 429-432
- 77 H. Choset, E. Acar, A. A. Rizzi, et al. Exact cellular decompositions in terms of critical points of morse functions[C]. In: Proc. Of IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation. San Francisco, USA, 2000: 2270-2277
- 78 孙树栋, 曲彦宾. 遗传算法在机器人路径规划中的应用研究[J]. 西北工业大学学报, 1998, 16(1): 79-83
- 79 张菁, 张铭钧, 段群杰. 基于模糊神经网络的水下机器人局部路径规划方法[J], 船舶工程, 2001, (1): 54-58
- 80 C. Honfner, G. Schmidt. Path Planning and guidance techniques for an autonomous mobile cleaning robot[J]. Robotics and Autonomous Systems, 1995, 14(2,3): 199-212
- 81 A. Pirazdeh, W. Snyder. A unified solution to coverage and search in explored and unexplored terrains using indirect control[C]. In Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 1990, vol. 3: 2113-2119
- 82 A. Zelinsky. A mobile robot exploration algorithm[J]. IEEE Trans. Robot. Automat., 1992 (8): 707-717
- 83 J. Borenstein, Y. Koren. Obstacle avoidance with ultrasonic sensors[J]. IEEE Trans. Robot. Automat., 1998 (4): 213-218

- 84 J. Lengyel, M. Reichert, B. Donald, et al. Real time robot motion planning using rasterizing computer graphics hardware[C]. Proceedings of SIGGRAPH, 1990: 327-335
- 85 K. Konolige. A Gradient Method for Realtime Robot Control[C]. Proc. of the IEEE, 2000

## 作者在攻读硕士学位期间发表的论文

1. 刘奎, 张赤斌等. 在未知环境下完全遍历算法——等单元分解法. 系统仿真技术, 2005, Vol. 1 No. 3:136-140