

学科门类：工学
中图分类号：V249

单位代码：10287
密 级：公开

硕 士 学 位 论 文

微型飞行器试飞测试平台研究

研究生姓名 韩煜

一级学科 控制科学与工程

学科、专业 控制理论与控制工程

研究方向 计算机控制

指导教师 曹云峰

南京航空航天大学

二〇〇三年二月

学科门类：工学
中图分类号：V249

单位代码：10287
密 级：公开

硕士学位论文

微型飞行器试飞测试平台研究

研究生姓名 韩煜

一级学科 控制科学与工程

学科、专业 控制理论与控制工程

研究方向 计算机控制

指导教师 曹云峰

南京航空航天大学

二〇〇三年二月

A Thesis for Master Degree of Engineer

**STUDY OF MICRO AERIAL VEHICLES
TEST FLYING SURVEY PLATFORM**

Name: Yu Han

Supervisor: Prof. YunFeng Cao

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics

February 2003

摘 要

所谓微型飞行器，就是指载有微小型传感器的自主控制飞行器，且具有一定的侦察、监视能力。无论是研究飞行器微型化后在空气动力学上的特性，还是飞行器自主飞行控制律的设计都需要大量真实、可靠的飞行试验数据。本文正是基于这样的研究背景，提出了一种微型飞行器飞行试验研究方案。其实质是以地面计算机的记录、监测为核心的，实现了“天地互联”的试飞测试系统。整个系统由机载计算机、传感器、操纵输入数据采集部分和地面监控计算机组成。本文主要内容有以下几点：

- 遥控飞行中操纵输入数据的实时记录系统；
- 飞行试验数据的多种分析方法；
- 飞行监测系统功能和软硬件实现；
- 无线电遥控遥测链路方案设计。

[关键词] 微型飞行器，飞控系统，传感器，串行通信，数据记录，无线电，遥控遥测

Abstract

The term, Micro Aerial Vehicle (MAV) is an autonomous small flight vehicle with some missions of scouting and monitoring. It is necessary to acquire a great deal of true, valid, entire data for researching Mav' s aerodynamics and designing Mav' s control law. Base on such context, this thesis poses a scheme for Mav' s test flying. The matter this scheme is discussing offers a test platform to unite air and ground with the center of computers. The platform consists of the board computer, sensors, input data acquisition and ground computer. The main work of the paper includes:

- Stick input data acquisition system base on RC mode
- Several ways to analyze flight test data
- Ground station as flight display and monitor
- The program for radio telecontrol and telemetry link

Keywords: Micro Aerial Vehicle (MAV), Flight Control System (FCS), Sensors, Serial Communication, Data recording, Radio, Telecontrol and Telemetry

目 录

第一章 绪 论.....	1
1.1 引言.....	1
1.2 微型飞行器试飞测试系统的提出.....	2
1.3 本文研究内容.....	3
1.3.1 操纵输入数据采集.....	4
1.3.2 飞行监测系统软硬件设计.....	4
1.3.3 遥控遥测链路.....	5
第二章 操纵输入数据记录系统.....	6
2.1 研究概况.....	6
2.2 系统总体方案.....	7
2.3 系统设计.....	8
2.3.1 遥控发射与接收.....	8
2.3.2 系统控制板.....	10
2.3.3 系统工作流程说明.....	14
2.3.4 数据记录显示软件说明.....	16
2.4 操纵输入记录数据分析.....	17
第三章 MAV 飞行监测系统组成及原理.....	21
3.1 飞行监测系统简介.....	21
3.1.1 普通意义上的监测技术.....	21
3.1.2 飞行监测系统.....	22
3.2 微型飞行器飞行监测系统组成.....	24
3.2.1 监测系统结构组成.....	24
3.2.2 系统功能组成.....	27
3.3 一种新型飞行监测方案简介.....	31
第四章 MAV 飞行监测系统功能详细设计.....	33
4.1 简单飞行任务监控.....	33
4.2 实时飞行显示.....	35
4.3 数据记录回放与分析.....	38
4.4 关键编程技术.....	40
4.4.1 线程.....	40

4. 4. 2 多媒体定时器	41
4. 4. 3 串口操作	42
4. 4. 4 ActiveX 控件在本程序的使用示例	44
4. 4. 5 数据库概述	44
第五章 遥控遥测链路	45
5. 1 遥控遥测概念	45
5. 2 本系统遥控遥测链路实现方案	46
5. 2. 1 nRF401 芯片简介	46
5. 2. 2 nRF401 芯片工作原理	47
5. 2. 3 硬件连接	49
5. 4 遥控遥测链路中的关键技术	49
第六章 总结与展望	51
6. 1 项目研究的意义	51
6. 2 主要工作说明	51
6. 3 展望与未来	51
参 考 文 献	53
致 谢	55

第一章 绪 论

[摘要]本章是全文的一个综述。通过对课题背景的介绍,对国内外微型飞行器研究工作现状的分析,结合本校实际研制情况,指出了微型飞行器试飞测试平台研究工作的重要性和迫切性。本章给出了该系统测试目标,实现设备,测试特点。此外,本章还对全文的内容组织,章节构成进行了叙述。

1.1 引言

微型飞行器(MAV—Micro Aerial Vehicle)作为无人作战系统家族的一名重要成员,以其小巧的外观和由此带来的低毁伤率,正日益受到关注。它是一种微小型自主式飞行器,非常适合于在城市作战以及小部队的特种作战。它可用于执行侦察及监视任务、引导武器瞄准重要目标、部署自主传感器、实施通信中继、对敌进行电子干扰、探测生化战剂和地雷、完成战果评估等战术任务。类似于无人驾驶飞机,微型飞行器涉及无线电技术、发动机技术、流体力学、飞行控制等领域,同时集中环境感知、动态决策、行为控制等多种功能融于一身,是一门综合了许多先进技术的复合性学科。有专家预测,它的诞生甚至有可能改变未来战争的模式。我们可以想象,微型飞行器未来将被设计成供步兵使用的“场外探测器”,以在战场上提高排一级水平士兵的环境感知力。微型飞行器应具备以下性能:隐身;结构紧凑,可置于士兵的装备中;工作稳定且易于操作和修理;价格在1000美元左右,不高于一般弹药。

回顾微型飞行器的历史,早在1992年,美国国防高级研究计划局(DARPA)主持了一个名为“未来驱动军事作战领域革命之关键技术”的研讨会。在该会议上,美国科学家 Bruno•Augenstein 首次提出微小型飞行器的概念。目前国内外公认的微型飞行器的基本技术指标是:飞行器各向尺寸不超过150mm,重量(10~100)g,续航时间(20~60)min,续航速度(30~60)km/h,系统承载重量(1~18)g,最大飞行距离(1~10)km,可实时传输图像,能自主飞行。在 DARPA 的研制项目中,按机翼特点又将微小型飞行器分为三类:固定翼式、旋翼式和扑翼式。其中,旋翼式类似于直升机,扑翼式类似于昆虫。研制最为成功的是 Aero Vironment 公司的“黑寡妇”(Black Widow)。其主要性能指标包括:圆盘形全长不超过15cm;翼展/旋翼直径15.24cm;起飞重量60g;翼载估算 $30\sim 40\text{ N/m}^2$;发动机功率/重量:4w/11g;电池/重量锂电池/26g;载荷包括:图像传感器系统/7g;GPS导航GPS装置与陀螺仪;飞行性能包括,巡航速度:48km/h;巡航时间:20min-60min;发射方式:肩扛式气压发射架发射。

显然,研制如此小的飞行器,有许多极其重要的工程问题需要解决。如:空气动力

力学问题、动力问题、飞行自主控制与通信问题、部件微型化, 轻型化与集成问题等。我们国家在微型飞行器的研究方面起步较晚, 目前和美国有一定差距。但只要 we 认清微型飞行器研究的重要意义, 依靠我们国家航空工业 50 年的发展, 微型机电系统 (MEMS) 技术在我们国家的广泛应用, 迎头追赶, 就一定能不断减小差距。另外根据国家 863 计划的要求, 对微型飞行器的研发工作也已全面展开, 相信随着研究工作的深入及相关技术的完善, 微型飞行器在国内的研究必将取得更大的进展。

南航作为我国航空航天领域一所著名重点大学, 最早在国内就开展了微型飞行器技术的研究。1998 年专门成立了“微型飞行器研究中心”。组成了一支跨学科、志同道合的研究队伍, 开展了一系列的基础理论、试验技术和微型飞行器研制技术的研究。该中心主要研究方向为: 微型飞行器布局、结构优化设计及加工技术、微型飞行器特殊气动特性和飞行原理、微型动力和能源装置、微型飞行器的自主飞行控制、微型飞行器信息传输技术。本人所在的自动化学院飞行控制研究所正是承担着微型飞行器自主控制和地面监测的理论与研究工作。目前阶段我们的微型飞行器在某些指标上并没有达到国际上的通行标准, 如尺寸和重量方面, 也许称为“微小型飞行器”更加合适, 这里为了简洁, 统称为“微型飞行器”。

1. 2 微型飞行器试飞平台系统的提出

本课题“微型飞行器试飞测试平台”的研究任务隶属于“十五”国防重点预研课题——微型飞行器关键技术研究。

试飞即是飞行试验。一种型号飞行器的研制成功, 需要经过设计、试制、定型试飞、设计定型以及批量生产等阶段。试飞测试平台的研制是定型试飞工作的一个重要环节。它根据飞行试验要求建立起一套完整的“机载”和“地面”测试平台, 经过试飞取得有关数据(参数), 然后进行数据处理, 供飞行器设计验证, 系统仿真分析使用。试飞测试平台的组建将直接影响试飞数据的精度和飞行安全。合理的测试目标, 正确的测试手段, 高效的测试设备才能保证试飞取得预期效果。目前国内外对试飞测试平台的研究多集中于大型机, 对微型、小型飞行器试飞测试平台的研究并不多见。考虑到微型飞行器和航模的相似性, 结合无人机试飞测试平台和航模操纵飞行方式, 设计了本文的“微型飞行器试飞测试平台”。系统构成示意图如下:

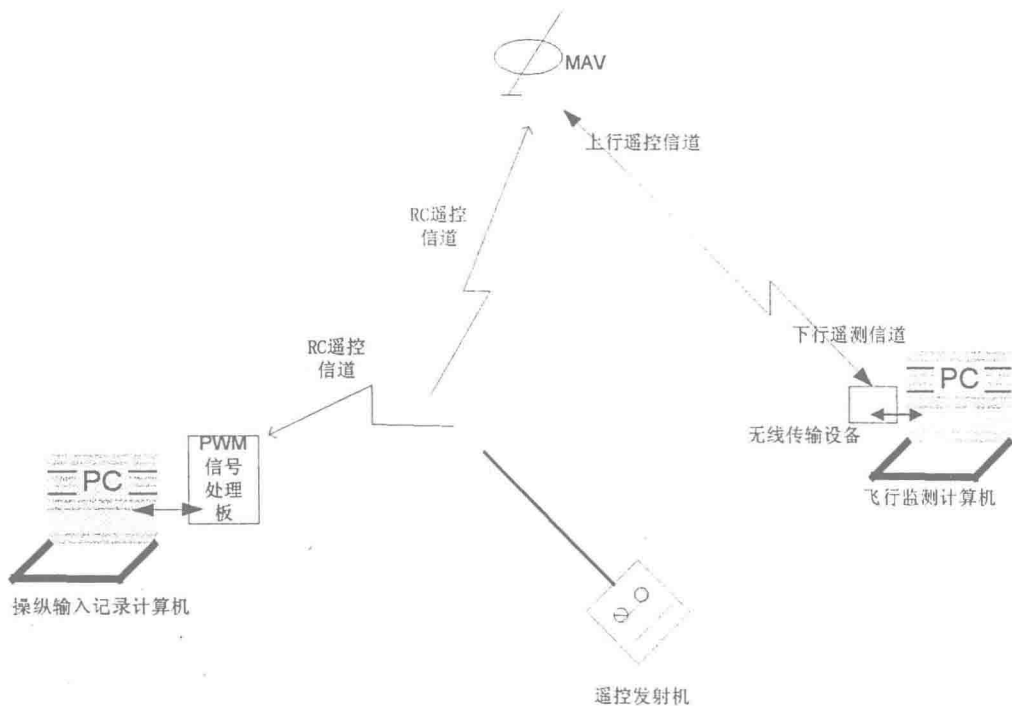


图 1-1 试飞测试平台示意图

从上图中可以看出，系统主要由操纵输入记录部分和飞行监测部分组成，当然两部分都不能脱离机载端的支持。操纵输入数据记录部分主要是实现对遥控输入数据的记录，而飞行监测系统是系统的核心部分，它与机载端一起实现微型飞行器的任务飞行，遥测数据记录。

微型飞行器试飞测试平台科目，或称目标重点集中在：

- ✓ 基础性试飞目标。包括空气动力学范畴，飞行器布局和结构的设计验证等；
- ✓ 飞行品质。主要是平滑性和适航性的研究；
- ✓ 操纵负荷。如何尽量减轻微型飞行器飞行过程中操作手的操纵负担。

本测试平台具有以下几个特点：

✓ 低成本。这是微型飞行器初期的尝试性研制阶段所必须考虑的，也是符合实际情况的；

✓ 易操作性。本套系统并不复杂，所有测试工作可在户外开阔地完成，且需要参与人员数很少；

✓ 可扩充性。系统在软硬件设计上，都考虑到微型飞行器进一步研制工作的需要，预留下部分功能接口。

1.3 本文研究内容

基于本人一年时间以来对微型飞行器试飞测试平台的研究和实践工作，本文详细地说明了各子系统的软硬件功能，设计思路和流程，给出了一种高效的测控监视解决

方案。在章节结构上，分为三大部分：第一部分介绍了一个遥控输入数据采集系统，主要为系统精确建模和控制律仿真提供数据积累；第二部分对系统核心——飞行监测系统进行了模块化的详细说明；第三部分给出了本系统遥控遥测链路的实现方案。下面分别加以说明。

1. 3. 1 操纵输入数据采集

首先提出了一种操纵输入数据采集方案。不同于比较成熟的常规无人机飞行控制系统的设计，微型飞行器的数学模型，控制规律都难以确立。所以在控制律设计，仿真分析过程中，为了避免盲目性、重复性，需要知道输入指令的大致范围，以便准确、安全、有效、地激发飞行器系统响应。通常的遥控方式下，操纵者凭借经验和技巧，遥控飞行器在视距以内持续保持姿态的稳定，完成飞行任务。这里在地面利用一个与机上完全相同的 RC 接收装置实时接收操纵输入指令并加以记录保存，可作为仿真分析的参考依据。另外可以把试飞条件、飞行试验操纵输入数据及相对应的飞行效果制成一个比对数据库，作为以后试验的一个预测和校验。

1. 3. 2 飞行监测系统软硬件设计

监测系统中，以往所采用的模拟指示和事后处理手段已远不能满足新一代飞行器的要求。这里采用界面友好的 NT 系统开发的新型监控测试系统，能用飞行区域实际地图为背景显示飞行航迹，能以直观的图形显示当前的飞行姿态和各路遥测数据。还能将遥控指令的发送和回报在屏幕上反映出来。同时，所有的遥控指令和遥测数据将被记录，可用于事后重放，分析整个飞行过程。

系统组成分为硬件和软件两大部分。硬件包括：计算机系统、数据通信设备、大屏幕显示系统和机载端传感器。软件包括：飞行任务监控、实时飞行显示、记录回放三大模块。实验环境下，本人所用计算机是 P4/256M/60G 兼容机，显示屏为 1024X768 高分辨率 CRT。数据通信设备采用 NORDIC 公司的 nRF401 单片无线收发一体芯片。软件采用 BORLAND 公司 C++BUILDER5 和 ACCESS 数据库系统开发，利用 CB5 自带的 BDE Administrator 来配置 BDE (Borland Database Engine) 应用程序并建立数据库驱动。飞行任务监控软件主要完成遥控命令输入、航点注入、遥控/定点导航切换任务；实时飞行显示软件是一个相当复杂的多任务系统，它包括：地图显示、遥测数据刷新、动态航迹显示多个功能模块；记录回放软件类似于实时飞行显示软件，但它的飞行数据来源于实时飞行显示软件存储在硬磁盘中的数据，而不是直接接收的各路飞行参数。它主要用于飞行过程的事后分析，类似于磁带记录信息的回放系统。它也具有快进、快倒、定格、慢动等特技效果。整个飞行过程中，机载设备和地面监测系统通过无线通信设备不断交换数据。上行遥控数据包括运行控制参数，遥控指令；下行遥测

数据主要为微型飞行器六自由度运动参数，传感器信息等。机载计算机与数据通信设备可以直接接口，地面计算机与数据通信设备接口为 RS232，通信协议为 9600, 8, n, 1。上下行数据均以帧结构传送。每帧由同步码标志帧起始，末尾以校验和结束。

1. 3. 3 遥控遥测链路

考虑到微型飞行器测控系统的需要，遥控遥测链路的数据通信设备选择依据是集成度高、传输距离合适、传输速率高、功耗低。nRF401 是 NORDIC 公司最新推出的单片无线收发一体的芯片，其特殊优点表现在：集成度高、收发天线合一、外围元件仅 10 个左右；是目前少数可以与单片机串口直接连接的芯片，易于编程应用。

第二章 操纵输入数据记录系统

[摘要]本章主要介绍了基于 RC 遥控的微型飞行器操纵输入数据采集与记录系统。对系统的软硬件设计思路,具体实现步骤详细进行了描述。最后从不同角度给出了几种记录数据分析的方法。

2.1 研究概况

微型飞行器大多数飞行实验都是应用传统的 RC 装置在视距以内进行遥控飞行,操纵者凭借经验和技巧,遥控飞行器在视距以内持续保持姿态的稳定,完成飞行任务。考虑到小型飞行器的尺寸,飞行距离超过 100 英尺以后,将很容易失去飞行器的方位和姿态信息,除非操纵者是靠装载在飞行器上的摄像头传回来的图像进行监控飞行,这在目前能源,传输带宽等问题尚未充分解决之前也是不现实的。因此,在这种条件下,操纵者更多是靠感觉来遥控飞行,负担过于繁重,难以达到理想效果。另外,在目前,微型飞行器模型不精确的前提下,为了进一步实现自主飞行,寻求适宜的控制算法,很有必要采取措施记录下飞行实验中的实际控制输入量,作为控制律设计、仿真分析的参考依据。RC 信号发射装置产生的多路脉冲信号滤波相加后,再对载频进行调频以后便送往信道传输。RC 信号接收端收到已调频的多路信号,首先进行解调,然后送往各路滤波器,把各路载波分离开来,最后进行第二次解调,便能获得所需要的模拟量,这里即是一系列脉宽调制信号(PWM)。送往对应舵机即可得到所需要的控制输入位置量。我们知道,普通 PC 是无法直接记录 PWM 信号的,要捕捉这些操纵输入数据量,需要经过一个解码的过程,即根据 PWM 信号的占空比,相应转化为正比的十六进制数据,经过串口传至 PC,然后在 PC 中对十六进制数据进行处理、还原、记录。

在参考了 Florida 大学航天工程,机械工程科学系师生在小型飞行器领域的研究成果后,设计制作了本操纵输入数据记录系统。数据采集(即 PWM 解码)部分用一个无需扩展附加电路的 Intel87C196KB 单片机作为主控单元,而记录部分(即 PC 部分)采用 BORLAND 公司的 Delphi5.0 作为开发工具,编制了实现接收、记录、分析、回放数据功能的 Windows 程序。

操纵输入数据记录系统研制完成以后,经过本人在实验室的多次测试,能够较好地完成任务。它整个飞行实验中,操纵手非正式的意见,经验性的感觉以一种客观,量化的形式成功记录并保存下来。如果能够结合飞行器上带的摄像头传回来的图片信息,我们可以方便的在多次试飞中寻找一次平稳,理想的飞行品质及其所对应的操纵输入数据。

只要数据传输速率,采样记录频率足够大,可以理想地认为本操纵输入数据记录系统是真实地备份了无线电遥控器操纵杆的动作过程。所以,我们可以采取多种方法

对这些记录数据进行取样分析。比如：1. 数据大小，平均值的统计，特别是中心点偏移量的统计；2. 描述操纵杆位置的柱状图；3. 操纵杆位置的频谱信息；4. 操纵杆移动速率的频谱信息；5. 固定时间段内杆反转次数的统计等等。这些信息的作用大致体现在如下 4 个方面：

- ▶ 验证微型飞行器的结构设计、材质选取、气动特性等问题；
- ▶ 验证微型飞行器的飞行品质，如平滑性和适航性等特征；
- ▶ 足够的控制输入量是对飞行器进行系统辨识，获取数学模型所必需的；
- ▶ 记录数据可以用来训练微型飞行器操纵手。

2.2 系统总体方案

为了捕捉遥控输入信息，我们设计了一个简单的系统控制板，在地面上与另一个同飞行器上接收机完全相同的接收装置相连接，它们工作在完全相同的频段上。因此，地面接收系统将误差很小地接收发射机遥控信号。系统板上利用一个 87C196KB 单片机为核心的控制单元把 PWM 信号解码为十六进制数据，并传给 PC 机进行记录和显示工作。图 2-1 即为整个系统工作基本示意框图。

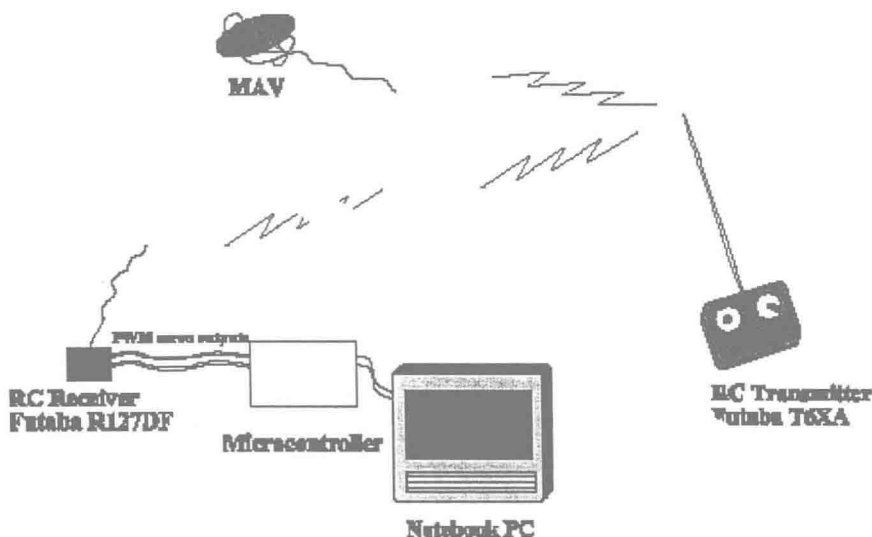


图 2-1 操纵输入数据记录系统工作示意框图

本操纵输入数据记录系统共可分为三部分：一. RC 接收机；二. 系统控制板；三. PC 记录软件。基本结构图如下图 2-2 所示：

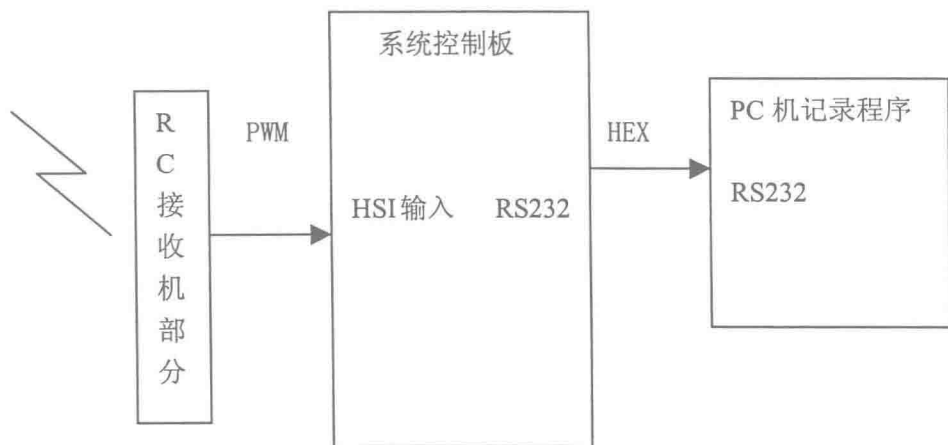


图 2-2 操纵输入数据记录系统结构框图

RC 接收机几乎无误差接收遥控输入信号，我们已经知道，这种遥控信号是一系列脉宽调制(PWM)无线电信号的叠加，它具有频率固定不变(50Hz)，占空比可调范围为 1.0ms--2.0ms 正电平的特性。只要电源开，遥控发射机即以 40.790M 的载波频率连续发送这种 PWM 信号。在接收机端，经过滤波分离后，可以得到五路互不干扰的 PWM 信号。这里我们选取四路作为系统控制板的输入，对于小型飞行器，四路通道是足够的。系统控制板利用 87C196KB 单片机的高速输入口(HSI)来实现 PWM 数据捕捉。通过单片机的通用异步传输口把 PWM 信号正电平持续时间对应实时传送到 PC 机，在 PC 中，按照一定的关系把此时间值还原为输入控制量显示并记录。

2.3 系统设计

系统共由二部分组成：一. 遥控发射与接收链路；二. 系统控制板解码与串行通讯电路部分。下面分别予以介绍。

2.3.1 遥控发射与接收

遥控发射机和接收机使用 FUTABA 4VF 型号，舵机是 FUTABA S3003 型号。遥控设备工作原理分析如下：该 4 通道的比例遥控设备，可以同时为模型进行四个不同动作(例如油门、升降舵、方向舵、副翼)的比例控制。这样的控制已十分接近载人飞机的操纵了。因此，如果能熟练地运用遥控设备和充分地掌握飞行器飞行的原理，操纵者可控制飞行器在天空自由飞翔。

发射机的组成如图 2-3 所示，它基本上是由操纵器、编码电路、开关电路、高频电路组成。操纵器与可变电位器电路连接，可变电位器又与信号发生电路——编码器连接，编码器发生的信号搭载在高频无线电波上由天线发送出去，进行调制。

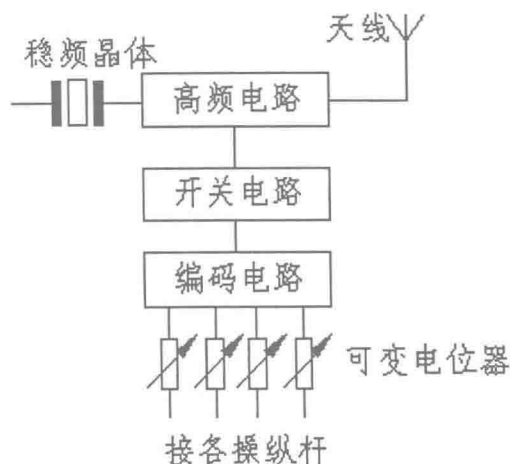


图 2-3 发射机组成示意图

遥控机发出的无线电波如图 2-4 所示, 操纵杆用脉冲信号 t_A 、 t_B 、 t_C 、 t_D 及矩形波 t_S (共 5 个信号) 组成一个周波, 在 1 秒时间内大约自动重复出现 30 个周波。 t_A 、 t_B 、 t_C 、 t_D 分别与和操纵杆连接的可变电位器相对应, 当操纵杆运作时, t_A 、 t_B 、 t_C 、 t_D 的信号随之改变其时间宽度, 促使与接收机连接的舵机做出相应成比例的动作。 t_S 信号与操纵杆控制无关, 有较长的时间宽度, 当接收机由于杂音信号干扰而引起信号排列紊乱时, 它能自动整形。在脉冲信号之间的 t_0 是没有无线电信号的间隔期, 它能使接收机可靠地区别多个信号。

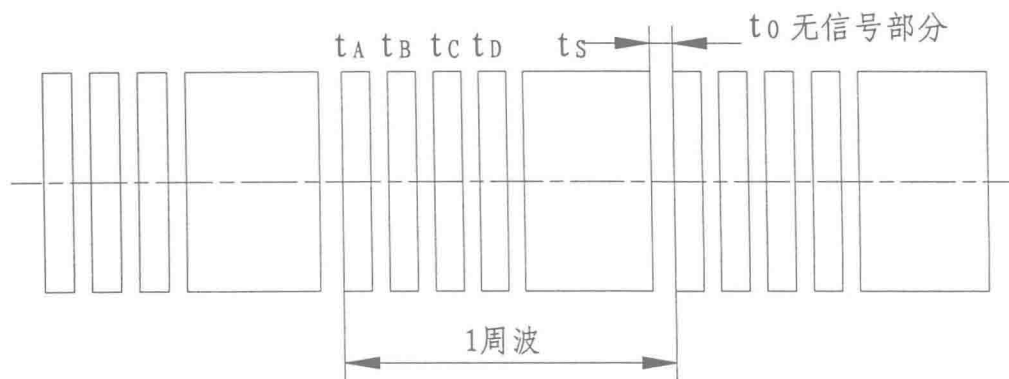


图 2-4 比例式遥控发射机发出的信号

接收机组成如图 2-5 所示, 它基本上可分成接收电路、译码电路等部分。从接收电路出来的低频输出通过译码电路就能分别独立地取出由发射机发出的操纵杆动作信号 t_A 、 t_B 、 t_C 、 t_D 。

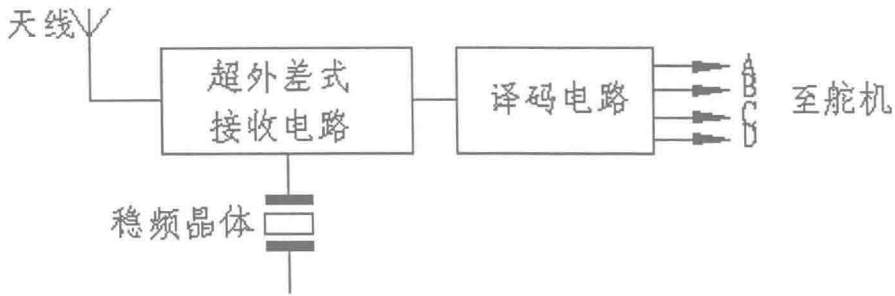


图 2-5 接收机组成示意图

接收机滤波分离后得到四路固定周期，脉宽可变的 PWM 信号。脉冲信号的帧周期一般为 20ms，中心位置脉冲宽度为 1.5ms，调节范围为 ± 0.5 ms。指令脉冲宽度的连续调节，通过比例舵机变为输出摇臂舵角在满幅度范围内连续变化。这里介绍的是理想情况，在实际中，FUTABA 遥控发射机上有一微调选钮，可以通过示波器来校准中心位置脉冲宽度。

2.3.2 系统控制板

本次实验的飞行器用三个通道：俯仰通道、滚转通道、方向舵通道。系统板上也分别的对应设计了三个通路，同时考虑到扩展性，预留一个备用通路。地面接收装置将遥控发射机的 PWM 信号传入系统板，与 87C196KB 的四路高速输入口 (HSI. 0--HSI. 4) 相连，利用 HSI 的记时特性，把 PWM 信号的正电平持续时间记录下来。这个时间值正是对应着正脉冲宽度和占空比的，也即是舵机输入控制量。原理图如下图 2-6 所示。