

# 按 UIC513 国际标准的振动舒适性测试技术

## 摘 要

随着人类科技水平和生活水平的提高，对交通工具舒适度的要求也渐渐上升，其中列车振动舒适性是反映列车运行品质的重要指标之一。按以往常规铁路以安全为控制条件，而如今高速铁路已把“舒适”作为设计控制要求。为了量化地评估舒适度指数，本课题根据国际铁路联盟《铁路车辆内旅客振动舒适性评价准则》(UIC513)，设计并开发了对列车运行时振动舒适性测量的测试系统，并且在此基础上开发了国内第一台便携式振动舒适性测量仪，为我国制定自己的铁路标准做出了贡献。本文主要介绍了该测试系统及测试仪的基本构成和功能，同时阐述了有关舒适度指数评估的具体方法和准则，还给出了相关的测试试验。

测试系统采用的是以便携式计算机为核心、模拟滤波电路为调理电路的多通道测试装置。硬件方面采用模拟电路技术实现生理滤波曲线的滤波要求，通过 PROTEL99、ORCAD 软件模拟仿真电路效果，模拟信号经过 A/D 转化通过打印接口与计算机进行数据通讯。而且引进 GPS 接收机来确定列车的行驶位置、车速和行驶里程。软件方

面主要采用 BASIC、汇编语言对数据进行储存、处理和图像动态显示，应用 MATLAB、ORIGIN 等处理软件对结果进行分析，为进一步判定提供了依据。

本文除了详细介绍振动舒适性测量的具体方法和评价准则外，同时还给出大量的试验数据和评定结果。该测试系统对沪宁铁路、沪杭铁路以及上海至厦门部分路段进行了大量的试验，结果和分析表明测试系统能够满足标准中的要求，并且数据后处理的结果对提高我国铁路发展具有很重要的价值，它也可作为制定我国自己的铁路车辆振动舒适性准则的重要依据。

**关键词：** 振动舒适性，旅客列车，测试系统，微处理器，

**便携式仪器**

**MEASUREMENT TECHNOLOGY OF COMFORT IN  
RELATION TO VIBRATION ACCORDING TO UIC513  
INTERNATIONAL GUIDELINE**

**ABSTRACT**

**As the improvement of people lives and technology level, more requirements are increasing to the comfort of vehicle. And comfort in relation to vibration in railway vehicle is one of important items which show the quality of running vehicle. High railway design regards the comfort as the control condition now more than the safe before. In order to evaluate quantitatively comfort in relation to vibration, a measurement system which evaluates passenger comfort in relation to vibration in trains is designed and developed according to guidelines for evaluating passenger comfort in relation to vibration in railway vehicle (UIC513), which is made by International Union of Railway. On this condition, the first portable comfort measurement machine is designed and developed, which contributes to the criterion of our country in railway. In this paper, the basic structure**

**and main function of the measurement system and machine, the specific method and principle for evaluating the comfort and test experiments are briefly introduced.**

**The system is a multi-channel instrument based on portable computer and includes analog filter circuits. For hardware design, the circuits are simulated by PROTEL99 and ORCAD in order to meet the requirements of physiology filter curve. The analog signals is converted into digital signals by A/D, which is transmitted to PC through the print cable. Also GPS receiver is equipped and provides the status of running train, such as direction, position and velocity etc. For software design, BASIC and ASSEMBLE language are used to save, process data and display the dynamic images. The software, such as MATLAB and ORIGIN, is used to process data and analyze the results, which can provide the reference to deep study.**

**The specific method and principle for evaluating comfort are introduced in detail in this paper. At the same time several test experiments are also provide. The test experiments have been done in different trains during the section of Huning high railway, Huhang high railway and the section between Shanghai and Xiamen. The results an analysis show that the measurement can meet the need of comfort measurement in UIC513, and the analysis results are very**

**valuable to improve the railway qualification of our country, which will be the important proof of establishing our own criterion for evaluating passenger comfort in relation to vibration in railway vehicle.**

**KEY WORDS: comfort in relation to vibration, passenger train, measurement system, microprocessor, portable machine**

# 上海交通大学

## 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：陈海波

日期：2002年1月30日

# 上海交通大学

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权上海交通大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密，在 5 年解密后适用本授权书。

本学位论文属于

不保密。

(请在以上方框内打“√”)

学位论文作者签名: 陈海波

指导教师签名: 倪纯珍

日期: 2002年1月30日

日期: 2002年1月30日

# 第一章 前言

## § 1.1 问题的提出

我国长期以来用行驶平稳性来评定列车的运行质量,其主要依据是斯佩林准则用 Y 向(横向)与 Z 向(垂直)两个方向加速度的测量值,按规定的算法求得评定结果。这些评定方法反映在我国 GB5599-85 《铁路车辆动力学性能评定和鉴定规范》和 TB/T2360-93 《铁路车辆机车动力学性能试验鉴定方法和评定标准》两份技术标准中。随人类对铁路交通要求的提高,特别在舒适性方面的要求,国际铁路联盟于 1994 年 7 月 1 日颁布了 UIC513 《铁路车辆内旅客振动舒适性评价准则》标准(94.7.1 第一版)。UIC513 标准完全区别于 GB5599-85 和 TB/T2360-93 标准。为了及时掌握和应用国际标准,并基于铁路广泛提速、磁悬浮铁路和高速铁路正在规划的现实,上海铁路局于 1999 年批准了《铁路车辆内旅客振动舒适度测量技术研究》的科研计划,由上海铁路局技术监督所与上海交通大学联合开展。

本课题是在此背景下根据国际铁路联盟规程《铁路车辆内旅客列车振动舒适性评价准则》(UIC513)的要求和评价方法,设计开发能对列车振动进行测量、分析、评估在给定的运行条件下特定车辆车内旅客乘车舒适性的测量系统,并且在此基础上,利用单片机开发研制出旅客列车振动仪。

近几年国家对基础设施的建设加大了力度,其中旅客列车因其运输量大,运载路程远,低能耗,环境污染小,经济性好的特点,在交通运输业中起着十分重要的作用。目前国家已经完成铁路系统的第四次提速,从而能更好地为高速发展的经济服务。自从 1964 年日本建成东海道新干线并正式运营高速列车以来,世界不少国家相继建成了高速铁路。试验列车的最高速度不断被打破,法国国铁于 1990 年创造了 515.3km/h 的记录,保持至今;目前高速列车的营运速度也一再提高,最高可达 300km/h。1994 年 12 月 22 日我国广深线正式开行了时速 160km 的准高速旅客列车,1995 年上海铁路局的沪宁线和北京的京秦线成功地进行了多次提速试验,并先后在沪宁线开行了“先行号”快速列车和铁路局在京秦线开行了“北戴河号”快速列车,这些发展大大增强了列车在交通运输业的竞争实力。同时,提高高速运行的稳定性和控制列车振动提高列车的舒适性的研究也已经作为今后进一步加快高速列车的建设的重要课题。本文就是通过对营运列车机械振动进行测量和分析,并进一步对乘车舒适度评估,为改善高速列车的营运条件,

提高运行安全性和稳定性提供一定的技术依据。

## § 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1. 舒适性评价的几种评价方法

铁道车辆“舒适度”指标，是一个很难定义的概念，广义地讲，舒适度是乘坐铁道车辆旅行的人对乘车旅行品质的综合反映评价。它与车内振动、噪声、温度、照明等物理属性有关，车辆外观、车内设计、车窗、乘务员的态度等也是影响因素。由于目前舒适度的评价国际上尚无统一标准，各国铁路使用过不同的方法评定铁道车辆的振动和旅客舒适度。可归纳为以下几种评定方法：

- 1) 利用车体振动加速度、车体在圆曲线上的未均衡离心加速度、未均衡离心加速度变化率或侧滚角速度等指标作为舒适度的评价指标。

其中车体振动加速度是最一般的舒适度评价指标。将振动加速度作为舒适度指标评价时，不仅要考虑加速度的大小，还要考虑振动的特性（频率等），具体评定标准在各国具有较大的差异。日本采用舒适度系数法评定标准，法国有疲劳时间法，欧洲一些国家采用 Sperling 平稳性指标等，有的对舒适度规定了控制限度，例如，50 年代日本进行过试验，以车内站立乘客中的 5% 不能容忍的未均衡离心加速度  $0.8\text{m/S}^2$  作为标准，对于未均衡离心加速度变化率一般希望控制在  $0.3\text{m/s}^3$  以下，侧滚角速度控制在  $5^\circ/\text{S}$  以下，还有美国的 R.N Janeway 提出的 Janeway 限度作为评定舒适度标准，主要针对车辆的垂向振动提出了舒适度标准，其优点是简单和易于解释。其公式表示如下：

$$J = \left\{ \begin{array}{ll} (1/6) a f^3 & f=1\sim 6\text{Hz} \\ a f^2 & f=6\sim 20\text{Hz} \\ 20af & f=20\sim 60\text{Hz} \end{array} \right\} \quad (1-1)$$

英国的 Loach 在对 Maujin 和 Sperling 等人的试验结果进行了分析比较后，绘制出等舒适度曲线。提出了以疲劳时间作为客车舒适度的评定方法。试图把车辆运行试验所获得的数据转换成旅客从乘车到疲劳所经历的时间，并以此时间为评定的依据。法国铁路的等效疲劳时间公式表示如下：

$$\text{横向: } T_r = \frac{280}{\frac{29.24 a_y}{(f - 5.2)^2 + 24.8} - 8} - 0.71 \quad (1-2)$$

$$\text{垂向: } T_z = \frac{280}{29.24 a_z} - 0.71 \quad (1-3)$$

$$\frac{1}{\sqrt{2(f-5.2)^2 + 24.8} - 8}$$

## 2) 心理评价法

这是一种采用打分和回答调查提问的形式,让被试者回答自己感觉的评价方式,同时也进行一些物理量的测试。重点调查使人愉快的附加服务和除去不良刺激使人舒适的主要因素,例如:振动、噪声、温度、湿度、照度、空气压力、空气清新度、车内设计、窗、席地及地板的清洁度、座间距等。日本某些研究人员曾在新干线上从事了这方面的试验,他们以车内测试的物理量、有关尺寸及问卷的评价值作为独立的变量,进行了同样的双回归分析,结果证实:以下5个变量组合的相关值大于0.7。振动的大小(仅取横向振动加速度);噪声的大小(车辆走行及等效噪声值);坐席尺寸(其中的座间距和座面面积);车内设计;空气清新度。为研究列车的舒适度评价指标,对2250名旅客的调查和物理指标的测量基础上,在分析获得的数据后,提出了2种类型的舒适度评价指标:一种是仅以物理指标为基础的简单指标,它与舒适度的相关系数是0.715,另一种是详细的指标,它采纳了物理指标,并加进了对座位舒适度和车厢内内清洁度的个人主观评价,它的相关系数提高到了0.877。

## 3) 生理评价法:

该法利用测定乘客心率、呼吸节拍、脑电波、肌肉电波等生理指标评价舒适度,虽然在国铁时代就开展了大量研究,但并未制定确切的指标,这是由于车内环境与人们的日常生活变化不大,不易使人们的自率神经产生变化,而且人与人之间的差别也很大,最近,随着计算机性能的提高和测试及手段的开发,正在验证用心率变化(HAV)等方法来评价舒适度,以求用自率神经的负荷状态来评价舒适度,但该法仍需继续探讨。

## 4) UIC513《铁路车辆内旅客振动舒适性评价准则》

经过长达10年的研究,1988年ERRI B153提出了UIC标准草案“铁路车辆振动舒适度评定指南”,经过审议1994年UIC正式以UIC513编号颁布执行。该标准是在研究振动与舒适度的关系以及振动对人体生理学的综合影响的基础上,得到的一种统计分析、评估舒适度的方法。由于仅考虑振动特性,摈弃某些主观、人为偶然影响因素,因此提高了评定舒适度的可靠性,同时最能体现影响舒适度的最关键的两个因素:车体本身的振动特性和轨道的不平顺性,另外,振动信号可通过实测得到,便于通过建立基于微机的测量系统自动采集、存储、处理。综

上所述, UIC513 标准提供了一种较为实用的舒适度评价方法。

本课题就是以 UIC513 标准为基础开发用于评估在营运条件下列车振动舒适性的测量系统及测试仪,同时对列车与舒适性相关的特性进行了研究,对在高速列车上如何提高舒适度进行了一定的探索。当然舒适度的指标是一个很难界定和评判的问题,随着列车速度的不断提高和乘客对客车的舒适性要求不断提高,舒适度的测量评定将会进一步的改进,这方面的研究将不断进行下去。

### 1.2.2. UIC513 振动舒适性的评估

平均振动舒适性的介绍

#### a) 旅客平均舒适性

每个人对振动舒适性的感受是不同的,因此不可能找到一种对每个人都适用的评价尺寸, UIC513 标准应用的振动舒适性的评估标准是根据 5 分钟期间内在车厢内所测得的加速度和一个有代表性的旅客小组所给出的振动舒适度平均值(公式中的系数)之间的关系给出的,结合两者的关系得出舒适度指数的计算公式。

本测量系统采用的是模拟——数字简化法,所用的舒适度计算公式:

$$N_{MV} = 6 \cdot \sqrt{(a_{XP}^{W_i} d_{95})^2 + (a_{YP}^{W_i} d_{95})^2 + (a_{ZP}^{W_i} b_{95})^2} \quad (1-4)$$

式中:

$N_{MV}$  ——为简化法旅客的舒适度值,

$a$  —— 表示加速度值,下标 X, Y, Z 表示加速度方向, P 表示车地板面  
 $W_i$  ( $i=b,d$ ) ——表示按计权曲线所采用的频率计权值

$b$  —— 垂直 (Z 方向)       $d$  —— 水平 (X、Y 方向)

下标 95 表示置信概率为 95%

$a_{X,Y,ZP}^{W_i} d_{95}$  分别为按车地板面 X、Y、Z 方向加权滤波曲线滤波在 95% 置信概率下得到的加速度统计值

#### b) 舒适度的评价方法

由于采用的是简化法,将整个试验线路按 5 分钟的路程进行分段,在每 5 分钟的试验区段内对加速度测量值进行采样,经过程序按照每 5 秒钟一时间段进行加速度有效值的计算,这样可以得到 60 个加速度有效值,再经程序,按照 95% 置信概率下根据舒适度计算公式求出这 5 分钟试验区段的舒适度指数。

#### c) 评价的尺度:

UIC513 标准中建议的舒适度指数尺度如下:

|       |         |       |       |
|-------|---------|-------|-------|
| N<1   | 非常好的舒适度 | 1<N<2 | 好的舒适度 |
| 2<N<4 | 中等舒适性   | 4<N<5 | 差的舒适度 |
| 5<N   | 非常差的舒适度 |       |       |

### § 1.3 研究的目标的任务

在 UIC513 标准的规定范围内，对旅客列车舒适度的测量有三种方法：数字完整法、数字-模拟混合法和模拟法，其中后两种方法属于简单方法的测试。而且在 UIC513 标准中提出了一个详细的测量系统，其分为记录用和评估用两个部分的组合，见图 1-1 和图 1-2：

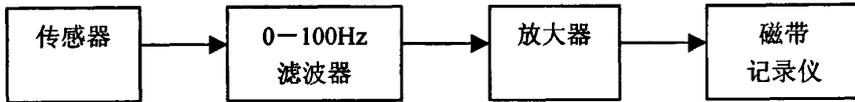


图 1-1 UIC513 标准记录用系统  
Fig1-1 UIC513 Recording System

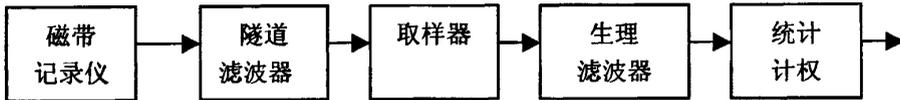


图 1-2 UIC513 标准处理用系统  
Fig1-2 UIC513 Processing System

本研究方案是按照简单方法的要求设计的，并且基于 90 年代末电子与计算机技术的高速发展现实：1) A/D 器件的速度提高 (>40KS/s) 和精度提高 (8—16bit)；2) 计算机 RAM 的高速 (ns 级) 和大容量技术 (64~256M)；3) 高速 (7600rpm) 大容量 (>40G) 硬盘的出现。故决定不采用 UIC513 推荐的磁带记录方式，设计出以计算机为核心的测量系统，用数字存储技术替代昂贵的磁带记录仪加滤波器的模拟存储系统，明显的提高了测量系统的机动性，免除了记录噪声和二次传递误差，且可实现实时监视和实时处理，系统框图见图 1-3。

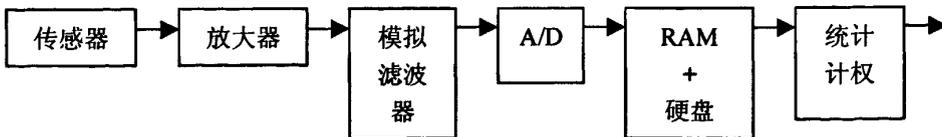


图 1-3 简单法 SSD-J-1 型测量系统框图  
Fig1-3 The Frame of SSD-J-1 Measure System

## 第二章 加速度传感器电路的设计

### § 2.1 传感器的选择

#### 2.1.1 列车信号的特点

传感器的选择是要根据测量信号的类型而定的,根据 UIC513 标准中参数,铁路车辆振动的主要的特征为:振动量级低,一般不大于 0.2g; 振动频率低,主要在 3Hz 以下; 车辆振动的波动性,所以统计值应该为计权均方根值,置信概率为 95%。因此针对以上情况已制定了适合上述条件的,特别是在频率 0.5-100Hz 范围内的生理反映计权曲线,而且只在车辆的指定位置和座椅上测量线加速度,旋转加速度由于其量值太小而不予考虑。

#### 2.1.2 传感器选择的原则

如何根据测试目的与实际条件合理地选用或设计传感器是在完成一项实验研究课题时所必然会遇到的问题。下面就选用传感器时应考虑的一些基本原则作一概略介绍:

1. 灵敏度——一般来讲,传感器的灵敏度越高越好,因为灵敏度高,意味着传感器所能感知的变化量小,即被测量稍有微小变化,传感器就有较大的响应,当然,也要考虑到当灵敏度高时,与测量信号无关的外界噪声也容易被混入,并且噪声也会伴随着被电子放大系统放大,这时必须考虑既要检测微小量值,又要保证噪声小,为做到此点,往往提出要求,信噪比越大越好。与灵敏度密切相关的是量程范围,当输入量增大时,除非有专门的非线性校正措施,传感器工作不应进入非线性区域,更不能进入饱和区域,某些测试工作要在较强的噪声干扰下进行,对于传感器来讲,其输入量不仅包括被测量,也包括干扰量,两者的迭加不能进入非线性区。此外当被测量是一个向量时,尤其是一个单向量,那么要求传感器单向灵敏度越高越好,而横向灵敏度越低越好。
2. 线性——任何传感器都有一定的线性工作范围,在线性范围内输出和输入成比例关系。线性范围越宽,表明传感器的工作量程越大,传感器工作在线性区内,是保证测量精度的基本条件,在某些情况下,在许可限度内也可以取其近似线性区域
3. 精度——传感器的精度表示传感器的输出与被测量的对应程度,传感器能否

真实反映被测量，对整个测试系统具有直接的影响

4. 零点温漂，灵敏度温漂——传感器的漂移量大小是表示传感器稳定性的重要指标。

传感器的零点温漂  $\gamma$  可按下式计算：

$$\gamma = [y_0(t_2) - y_0(t_1)] \times 100\% / Y(t_1)(t_2 - t_1) \quad (2-1)$$

式中：

$y_0(t_2)$  ——在规定高温或低温温度  $t_2$  保温一小时后，传感器的零点平均输出值

$y_0(t_1)$  ——在室温  $t_1$  时，传感器的零点平均输出值

$Y(t_1)$  ——在  $t_1$  温度下传感器的理论满量程输出

灵敏度温漂  $\beta$  按下式计算：

$$\beta = [Y(t_2) - Y(t_1)] \times 100\% / Y(t_2)(t_2 - t_1) \quad (2-2)$$

由以上指标，我们初步选定电容式加速度传感器，根据 UIC513 对传感器的技术要求和传感器技术指标的比较（见表 2-1）可以看出：这种传感器是满足要求的，并且具有体积小，集成度高（完全在一单片集成电路上），响应速度快等特点。

## § 2.2 XL05 和 XL202

### 加速度传感器的选择

加速度传感器是测量的关键部分，UIC513 对加速度传感器提出了一个严格的技术要求。考虑对 0.4Hz 低频的测量要求，传统方法采用伺服加速度传感器，但是鉴于伺服加速度传感器结构较大、价格较高，项目组在充分调研的基础上确定选用 XL05 和 XL202 集成电容传感器，取得了很好的效果。XL05 和 XL202 集成电容式加速度传感器将振荡器、传感器、调制器、解调器、高精度参考电源、前置放大及滤波器集成在一小片硅片上，如图 2-1、图 2-2。其具备一个（或两个—XL202）传感器与一台仪器的基本组合。其中加速度传感器的结构如图 2-3 所示：其为一个电容半桥，在零加速度时，动栅在两个定栅中间，输出信号平衡，相敏检波为零；在有加速度时，动栅向一个定栅接近而远离另一个定栅，从而构成二个电容量不等的电容半桥，输出与加速度相位及幅度相关的非平衡高频调制信号，此信号经相敏检波（调解处理）后即可获得与加速度相关的量化电压输出

值。

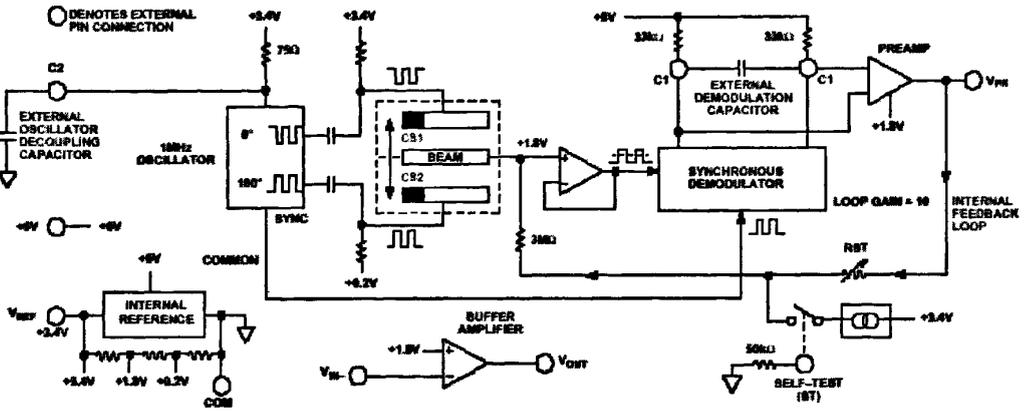


图 2-1 XL05 功能结构图

Fig2-1 XL05 Fuctional Block Diagram

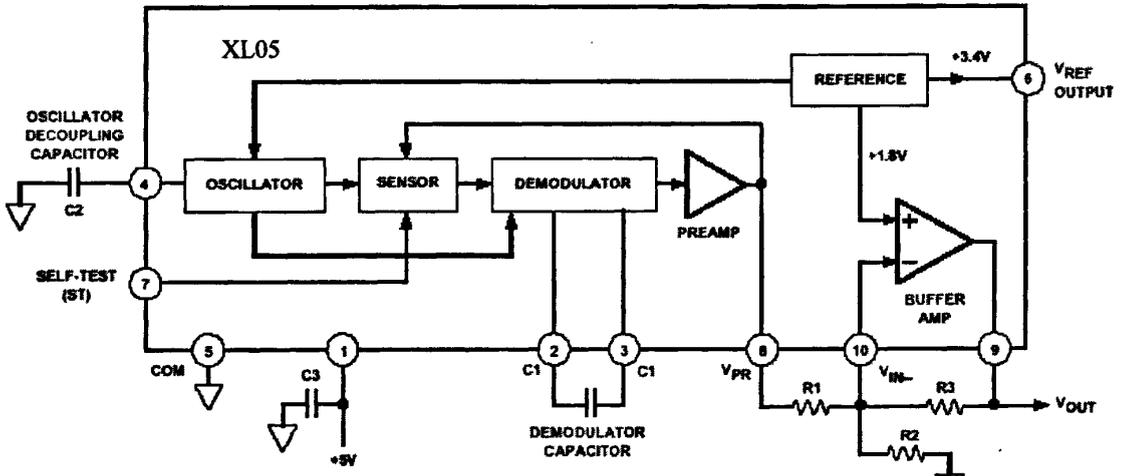


图 2-2 XL05 原理框图

Fig2-1 XL05 Element Block Diagram

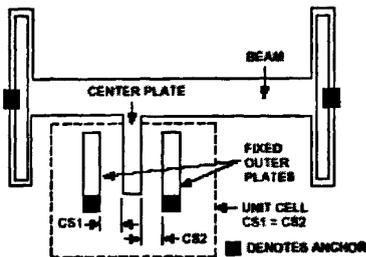


图 2-3 XL05 零加速度状况

Fig2-3 A Simplified Diagram of the XL05 at Reset

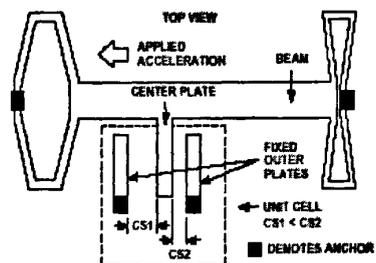


图 2-4 XL05 有加速度状况

Fig2-4 The XL05 Momentarily Responding to an External Applied Acceleration

表 2-1 阐述了 UIC513 标准中对加速度传感器的技术要求, 标准中推荐产品 (DUPONT) 的技术指标及项目组选用产品 (XL05 和 XL202) 指标的对照, 其中黑体字表明技术领先的参数。

表 2-1: 加速度传感器的技术要求  
Table2-1 Acceleration Sensor Specification

|   | 内容           | 单位                                 | UIC513              | DUPONT                    | XL05                                   | XL202                                  |
|---|--------------|------------------------------------|---------------------|---------------------------|--|--|
| 1 | 测量范围         | m/S <sup>2</sup>                   | 20-50               | <b>50</b>                 | <b>50</b>                              | 20                                     |
| 2 | 总传输函数        | HZ                                 | 0.4~<br>100HZ       | <b>0~300HZ</b>            | 0~<br>1000HZ                           | 0~<br>1000HZ                           |
|   |              | dB                                 | <0.5                | <b>&lt;0.5</b>            | <2<br><b>0~300HZ</b><br><b>&lt;0.5</b> | <2<br><b>0~300HZ</b><br><b>&lt;0.5</b> |
| 3 | 非线性<br>+滞后   | %                                  | ≤0.3                | ≤0.3                      | ≤0.2                                   | ≤0.2                                   |
|   |              | (m/S <sup>2</sup> )                | -                   | 0.15                      | 0.1                                    | 0.04                                   |
| 4 | 横向灵敏度        | m/S <sup>2</sup> /m/S <sup>2</sup> | ≤0.05               | ≤0.03                     | ≤0.017<br><b>1Degrees</b>              | ≤0.017<br><b>1Degrees</b>              |
| 5 | 温度—<br>零点漂移  | %<br>测量范围                          | ≤3                  | ≤ <b>0.02</b>             | ≤1.8                                   | ≤3                                     |
|   | 温度—<br>灵敏度漂移 | /°C                                | ≤5X10 <sup>-4</sup> | ≤2.5<br>X10 <sup>-4</sup> | ≤2 X10 <sup>-4</sup><br>0.5%/25°C      | ≤3 X10 <sup>-4</sup><br>0.5%/25°C      |

表 2-1 中 XL05,XL202 传感器的原始技术参数来源及说明见表 2-2。

表 2-2 XL05,XL202 传感器技术参数  
Table2-2 XL05,XL202 Acceleration Sensor Parameter

| Parameter                               | Conditions                     | Min   | Typ   | Max   | Units        |
|---|--------------------------------|-------|-------|-------|--------------|
| SENSOR INPUT                            |                                |       |       |       |              |
| Measurement Range                       | Guaranteed Full Scale          | -5    |       | +5    | g            |
| Nonlinearity                            | Best Fit Straight Line. 5 g FS |       | 0.2   |       | % of FS      |
| Alignment Error <sup>1</sup>            |                                |       | ±1    |       | Degrees      |
| Transverse Sensitivity <sup>2</sup>     |                                |       | ±2    |       | %            |
| SENSITIVITY                             |                                |       |       |       |              |
| Initial Sensitivity at V <sub>FM</sub>  | +25°C                          | 175   | 200   | 225   | mV/g         |
| Initial Sensitivity at V <sub>OUT</sub> | +25°C, R3/R1 = 5               | 0.875 | 1.000 | 1.125 | V/g          |
| Temperature Drift <sup>2</sup>          |                                |       | ±0.5  |       | % of Reading |

Specification refers to the maximum change in parameter from its initial at +25°C to its worst case value at TMIN to TMAX .

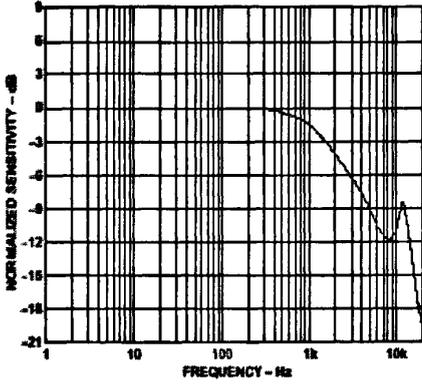


图 2-5 XL05,XL202 频率响应曲线误差  
(0~300HZ 频带范围内误差接近 0dB)  
Fig2-5 Normalized Sensitivity vs. Frequency

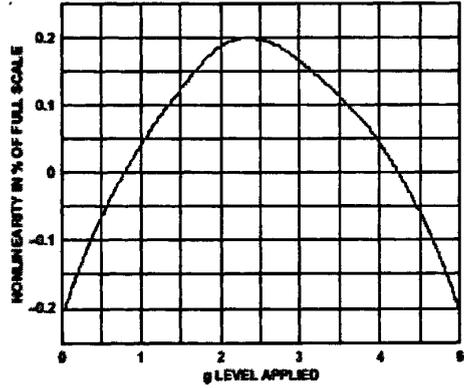


图 2-6 测量范围的非线性  
Fig2-7 Nonlinearity vs. g Level Applied

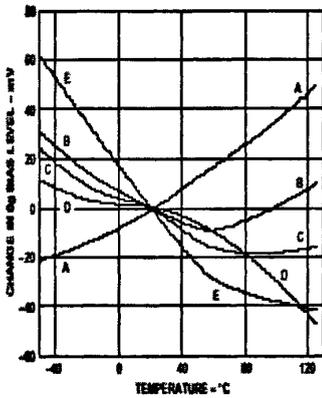


图 2-7 零点温漂  
Fig2-7 Change in 0g Bias Level vs. Temperature

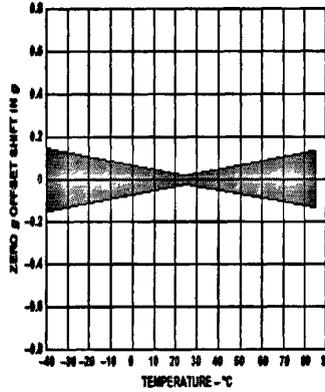


图 2-8 灵敏度温漂-1  
Fig2-8 Typical Zero g Offset vs. Temperature-1

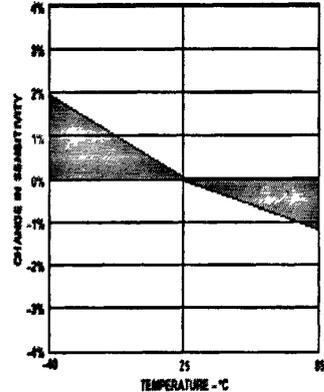


图 2-9 灵敏度温漂-2  
Fig2-9 Typical Zero g Offset vs. Temperature-2

- 1) XL05 测量范围为  $50\text{m/s}^2$ , XL202 为  $20\text{m/s}^2$ , 满足 UIC513 标准的技术要求;
- 2) 图 2-5 表明: XL05 和 XL202 的总传输函数在 0-1KHz 范围内误差为 2dB, 在 0~300HZ 频带范围内误差接近 0dB, 明显小于 0.5dB 的水平, 满足 UIC513 标准的技术要求;
- 3) XL05 和 XL202 在测量范围的非线性误差见图 2-6, 其表明在测量范围的误差为  $\pm 0.2\%$ , 满足 UIC513 标准的技术要求;
- 4) 在 XL05 和 XL202 资料中, 未给出横向灵敏度指标, 但表 2 给出传感器轴向偏差角为 1 度, 由电容传感器结构 (见图 2-3、图 2-4) 表明,

轴向偏差是产生横向灵敏度的主要原因，其输出比可用下列计算求得

$$\text{横向灵敏度} = [G_x \times \sin(\alpha) / G_x] = 0.017; \quad \text{式中 } \alpha = 1$$

按 UIC513 标准横向灵敏度  $\max = 0.5$ ，(即  $\alpha$  可以为 3 度)；指标满足技术要求；

- 5) 零点温漂由图 2-7 所示：对 XL05 和 XL202 中民用级别产品 (E 级) 在  $-40^\circ\text{C} \sim 120^\circ\text{C}$  范围的零点温漂为 100mv，按 XL05 的标称灵敏度  $20\text{mv}/\text{m}/\text{s}^2$  计算，最大零漂 =  $100\text{mv}/(50 \times 20) \times 100\% = 10\%$ 。但按使用温度  $0^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$  范围，零点温漂为 18mv，最大零漂 =  $18\text{mv}/(50 \times 20) \times 100\% = 1.8\%$ 。此值虽不及 UIC513 推荐的产品 0.02% 的水平，但仍优于 UIC513 标准中 3% 的技术要求。

- 6) 灵敏度温漂，由图 2-8、图 2-9 及表 2-2 给出为  $\pm 0.5\%$  数值范围。同时又指明由允用温度范围 ( $0^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$ ) 中的  $\pm 25^\circ\text{C}$  范围的变化，如  $0^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ ，由此可求得灵敏度温漂为：

$$0.5/100/25 = 0.0002 = 2 \times 10^{-4}, \quad \text{指标满足 UIC513 标准的技术要求。}$$

以上分析表明 XL05 和 XL202 传感器，完全达到且优于 UIC513 标准的技术要求，具体的电路设计见图 2-10。

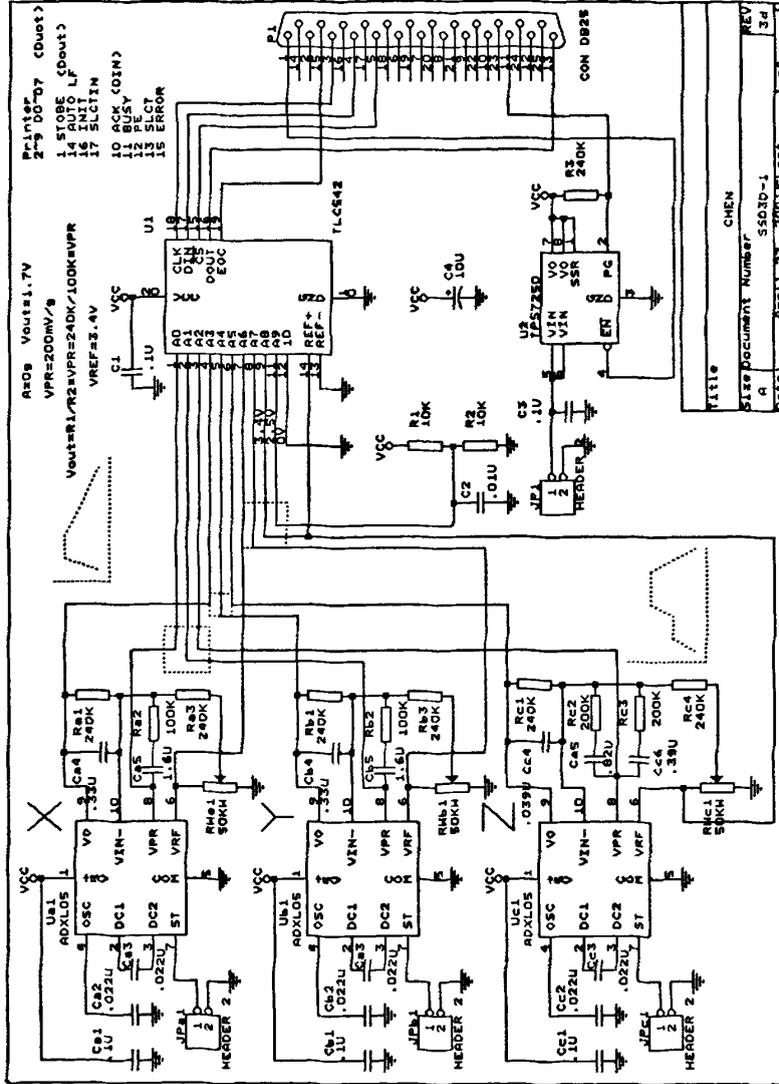


图 2-10 加速度传感器电路图

Fig2-10 The Circuit Designed with XL05

## 第三章 MSP430F149 单片机

### § 3.1 主要特点

#### 3.1.1. MSP430 系列简介

MSP430F149 是 TI 公司最新推出的一款超低功耗的微处理芯片系列, 适用于各种功率消耗要求特别的场合, 它能够满足作为智能型液晶显示振动测试仪的系统芯片的要求。主要因为它具有超低功耗、16 位精简指令、内置 A/D 转换器、串行通信接口、硬件乘法器、LCD 驱动电路及高抗干扰能力等技术特点, 能满足低功耗、高集成度、宽温度范围、高精度 A/D 转换等技术要求。

#### 3.1.2. MSP430F149 主要特点

我们之所以选择 MSP430F149 作为测试仪的系统芯片, 主要是考虑到它是 TI 公司 2000 年底新推出的超低功耗 Flash 型的 16 位 RISC 指令集单片机, 具有丰富的片内外围模块, 性价比极高。其中 MSP430F149 包含一个具有 8 个外部通道的 12 位高性能 A/D 转换器、一个具有自动扫描功能的容量为 16 个字的可编程缓冲器、片内参考电压、一个温度传感器以及电池低压时的检测电路, 其中 A/D 转换器的速度可高达 200KHz。利用芯片内置的自动扫描功能, A/D 转换器可以不需要中央处理器的协助而独立工作, 并且将转换后的数据自动存入缓冲区。这样, 中央处理器的工作负担就大为减轻。换言之, 我们可以让处理器去执行其它的数字信号运算或进入省电工作模式。除此之外, 内置的参考电压以及温度传感器可以减少外部器件数目并且降低系统的整体成本性。

由于内置了功耗极低的快速闪存, MSP430F149 在待机模式下所消耗的电能少于电池未使用时的自然损耗。此外, 这些器件可在 6mS 之内从待机模式立刻转回到完全工作模式, 由于在启动的过程中器件不会浪费任何时间, 因此可再延长电池的寿命。在正常的工作状态下, 如果工作电压为 2.2V, 那么器件每个 MIP 所消耗的电流只有 250  $\mu$ A。MSP430F149 的工作电压范围是 1.8V~3.6V, 最大运算速率为 8MIPS。MSP430F149 采用 64 管脚的 QFP 封装且管脚完全兼容。

而且MSP430F149片有60K的ROM、2K RAM、两个串行口, 其中Timer\_B有7个捕获/比较器, 这为我们进行数据储存和通讯带来了极大的方便。具体特性如下:

- a) 低电压：工作电压为1.8—3.6V
- b) 超低功耗：有5种节能模式，其中LPM4数据保持模式仅耗电0.1uA，活动状态耗电200uA；
- c) 从低功耗模式到活动状态只需6uS
- d) 功能强大的CPU内核，16位RISC结构，高效的寻址方式，在8MHz 时可得到125ns的指令周期，具有16个快速响应中断，能及时处理各种紧急事件。

3.1.3. MSP430F149 的超低功耗特性

由于我们设计的是便携式测试仪，它对功耗方面要求很高，要尽其可能的节电以保证长时间的工作，而MSP430F149在这方面满足了我们的要求，其超低功耗性能的实现主要与它对时钟的产生与控制密切相关。在超低功耗的设计中CPU的大部分时间都在休息（处于休眠状态）。MSP430F149有5种低功耗模式，在主程序中，CPU完成了相应的设置或任务之后，就让CPU进入适当的低功耗模式，CPU所需完成的大部分工作都在中断服务程序中完成，由相应的中断唤醒CPU，完成中断服务。执行完成之后，再进入低功耗模式，同时通过片内的时钟控制电路分别形成ACLK、MCLK、SMCLK等时钟信号，而且这些时钟的频率可由用户调节。用户精心设计各功能模块的时钟源，并在适当的时间打开或关闭相应模块的时钟，就可设计出超低功耗性能。低功耗模式的进入或退出主要由SR（状态寄存器）中的SCG1、SCG0、CUPOFF、GIE、位控制。

取样速率为200 kHz的12位A/D转换器，加上MSP430F149的所有其它功能，再加上睡眠模式只须0.1 uA以及待机模式只须1.5 uA的无与伦比的超低功耗特性，这就是该单片机器在使用电池的各种应用系统中能占有一席之地的原因。对于远程感测和数据量测的应用系统而言，只要利用这类功耗极低的器件，那么电池在10或15年内都不必更换。

§ 3.2 MSP430F149 的结构简介

3.2.1. MSP430F149 的引脚

MSP430F149 为 64 管脚的 QFP 封装且管脚完全兼容，如图 3-1。从图中可以看出该芯片各个引脚的功能，共有六个端口，每个端口均为功能复用，即每个口即拥有功能端口，又可以直接作为输入输出用，完全由软件来控制，这样为开发系统带来了极大的方便，增加了灵活性。

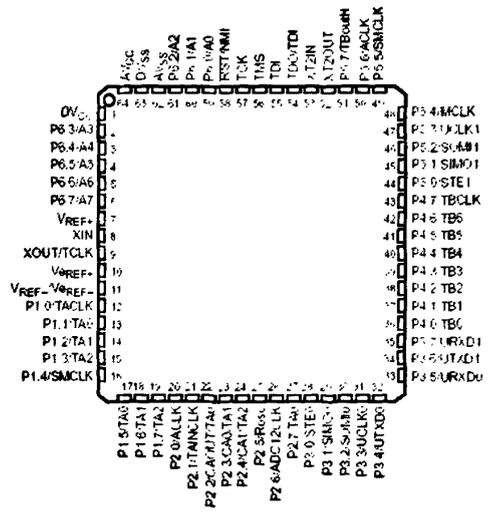


图 3-1 MSP430F149 的引脚图  
Fig3-1 MSP430F149 Pins Diagram

### 3.2.2. MSP430F149 的片内外围模块

随着集成电路技术和工艺的飞速发展,真正单片化的单片机已经成为主流产品,而我们在选择系统芯片的时候,也要尽可能的选择内部更多集成我们要求功能的微处理器,这样既可以节省外围设备,又为设计带来方便,而且降低了成本,MSP430F149具有丰富的片内外围模块:

- a) 12位的A/D转换器ADC12,有8个外通道,4个内通道,高达200KHz的采样速率以及多种采样方式。
- b) 16位Timer\_A与16位Timer\_B,可方便地实现UART、PWM、斜坡ADC。
- c) 1~2个串行口可用于UART模式、SPI模式。
- d) 硬件乘法器可快速执行8×8、8×16、16×16乘法操作立即得到结果。
- e) 6个并行口P1—P6,48条I/O口线,其中P1、P2具有中断能力。
- f) 灵活的时钟系统。
- g) 由可编程内部电阻控制频率的DCO。
- h) 由单一电阻控制频率的DCO。
- i) 32768Hz晶体产生低频时钟。
- j) 高频晶体产生高频时钟。
- k) 可使用外部时钟源。

### 3.2.3. MSP430F149 的结构框架

MSP430F149 内部结构如图 3-2 所示,主要包括:CPU、程序存储器(60K FlashROM)、数据存储器(2K RAM)、振荡器与时钟系统、A/D转换器、JTAG口、定时器(Timer\_A和Timer\_B)、硬件乘法器、I/O口、看门狗(WatchDog)和串行口。

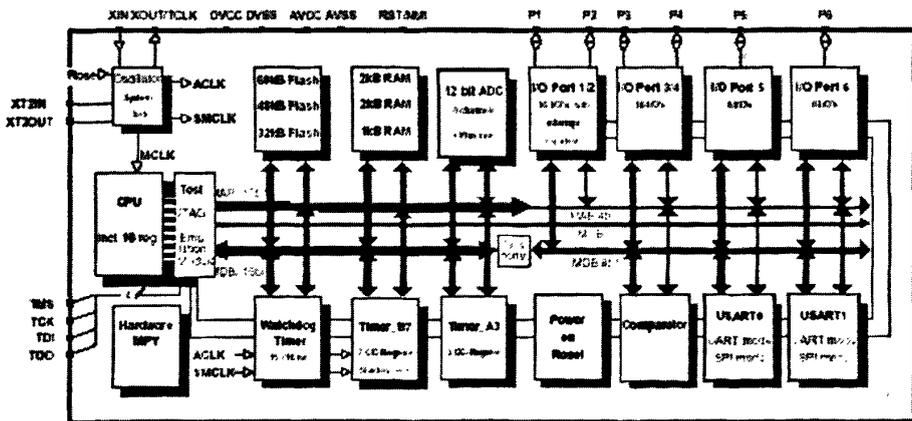


图 3-2 MSP430F149 的结构框架图  
Fig3-2 MSP430F149 Functional Block Diagram

### § 3.3 MSP430F149 的主要功能模块

#### 3.3.1. 16 位 CPU

MSP430F149 的 CPU 运行正交设计的、对模块高度透明的精简指令集。它由 16 个 16 位寄存器和一套控制逻辑指令组成，这些寄存器大大缩短了指令执行时间。这 16 个寄存器 (R0~R15) 中有 4 个 (R0~R3) 是为系统所保留，有特殊用途的，它们分别是程序计数器 R0、堆栈计数器 R1、状态寄存器(常数发生器)R2/CG1、常数发生器 R3/CG2，其余 12 个寄存器是通用工作寄存器。具体各个寄存器的功能可参考图 3-3。除了 R3/CG2 和 R2/CG1 外，所有寄存器都可以作为通用寄存器来用所有指令操作。常数发生器用于执行指令时提供常数。

外围模块通过数据总线、地址总线和控制总线与 CPU 连接，可以方便的实现存储器操作指令。

#### 3.3.2. MSP430F149 的基本时钟系统

MSP430 系列之所以具有超低功耗特性，主要有两个原因：①16 位精简指令结构；②时钟/振荡子系统。MSP430F149 引入了一个新的时钟系统，该基本时钟系统虽然较以前的简单，且更具灵活性。

MSP430F149 的基本振荡器系统包括 3 个振荡器，它们是：LF/XT1、XT2 和数字控制振荡器(DCO)。

##### i. LF/XT1 振荡器

MSP430 的 LF/XT1 是一个 32.768KHz 的振荡器，具有一种可以通过软件选择的高频模式。在这种高频模式下，振荡器通过陶瓷电阻和石英晶体工作，频率范围可以从 450 kHz 到 8 MHz。但是与在 32.768KHz 下工作相比，在高频模式下工作，振荡器的电流消耗显著增加。从图 3-4 我们可以看出 LF/XT1 振荡器的结构框架。

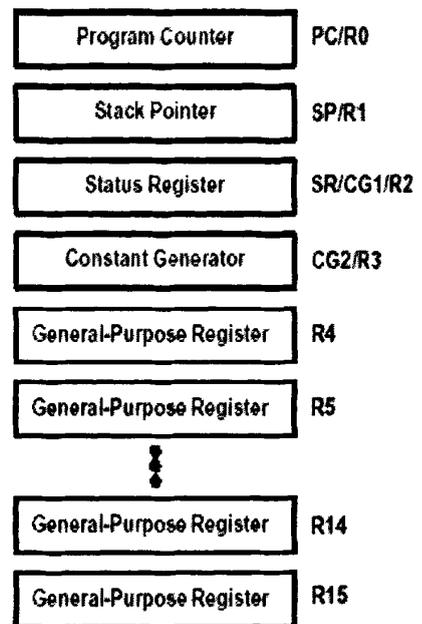


图 3-3 MSP430F149 的寄存器  
Fig3-3 MSP430F149's Register

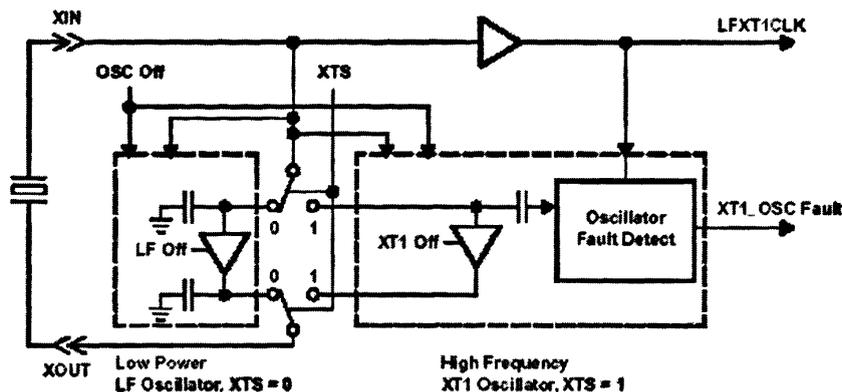


图 3-4 LF/XT1 振荡器

Fig3-4 LF/XT1 Oscillator

为了节省能耗，控制位 `OscOff` 允许系统在不必要的时候关闭振荡器。`XTS` 控制位允许使用软件选择 32KHz 工作模式或者高频工作模式。当在高频模式下工作时，需要在 `XIN` 和 `XOUT` 脚上外接电容；而在 32KHz 晶振下工作时则无需外接电容，因为装置中已经集成了 12pF 的电容。

### ii. XT2 振荡器

`XT2` 振荡器与 `LF/XT1` 振荡器的高频部分相同，但是它不支持低频工作模式 (32.768KHz)。图 3-5 所示是 `XT2` 振荡器的结构框架图。同样，需要在 `XIN` 和 `XOUT` 脚上外接电容。

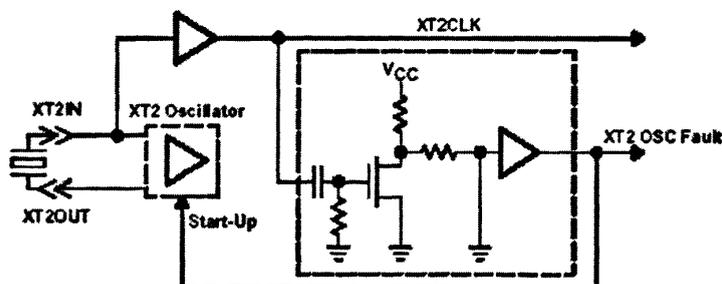


图 3-5 XT2 振荡器

Fig3-5 XT2 Oscillator

### iii. 数控晶振 (DCO)

基本时钟系统的 `DCO` 没有 `FLL`(锁频环)反馈环，也就是说它是一个自由运行的 `DCO`。图 3-6 所示是 `DCO` 的框架图。使用 `DCO` 与使用基于共鸣器的振荡器相比较，有以下几个优点：

- 它是一种低成本的解决方案，无需外部元件。但是，如果内部的控制电阻不适用，那也可以替换一个外部电阻。
- 它开始振荡迅速，无需启动延时。
- 工作电流相对较低。
- 工作频率可以通过软件来选择。
- 如果外部的 XT1 或 XT2 晶振或共鸣器失效时，系统会在由内部电阻控制的输入电流的驱动下转而使用内部的 DCO 以继续工作。

当然，DCO 也有它的不足之处：

- 它的工作电流没有使用 32KHz 低频晶振时低。
- 使用 DCO 时，它的输出频率会随着温度和工作电压的变化而漂移。

如果应用中需要一个稳定的 DCOCLK，那么可以通过软件控制环参考频率来实现。这个参考频率可以是来源于 32KHz 低频晶振的 ACLK，也可以来源于简单的外部 RC 电路。具体操作是首先运行软件控制环，再由它定时地调整 DCO 的频率。

当要求系统以最低功耗运行时，还需要用到 32KHz 低频晶振。它可以用来维持 DCO 频率的稳定，在低功耗模式下，其工作电流远远小于 DCO。如果应用中需要非常稳定和非常精确的时钟频率，那么可以采用高频振荡器 XT1 或 XT2。

DCO 和陶瓷共鸣器或石英晶体的结合使用，可以在特定要求下使系统最优化运行。当系统上电或复位时，MCLK 和 SMCLK 自动切换到 DCOCLK 时钟源，内部电阻为 DCO 的直流电发生器提供必要的电流，并选中一个合适的 DCO 频率范围。这样就确定了 DCOCLK 的频率。然后应用程序根据需要开始设定时钟系统。

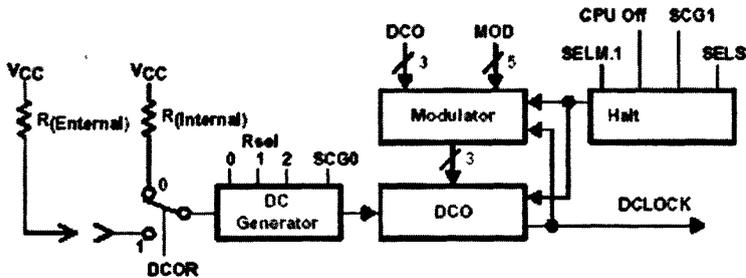


图 3-6 DCO 框架图

Fig3-6 The Block Diagram of DCO

MSP430F149 的基本时钟系统有 3 个时钟：ACLK(32KHz)驱动外设，MCLK (名义频率 500KHz~5MHz) 驱动 CPU 及外设和一个内部时钟 SMCLK，专门为外围部件服务。这样，系统的 3 个时钟源 LFXT1, XT2 和 DCO 可以自由地和 3 个内部时钟 ACLK, MCLK, 和 SMCLK 相连接。此外，还有一个可编程的分频器

可以把 3 个时钟源作 1/1、1/2、1/4 以及 1/8 分频。由于时钟分配系统可以选择 3 个内部时钟 ACLK, MCLK, 和 SMCLK 中的任何一个作为不同的时钟源, 这就大大提高了系统的灵活性。

### 3.3.3. MSP40F149 的工作模式

MSP430F49 的工作模式以先进的方式支持超低功耗的各种要求。这是通过运行管理和 CPU 的状态组合而得到的。无论系统处于何种工作状态, 只要一个中断事件就可以立即把系统从当前工作模式中唤醒 (最快的唤醒只需要 6nS), 而 RETI 指令又可以使运行返回到中断事件发生前的工作模式。

MSP430F149 总共有 6 种工作模式, 其中一种正常工作模式 AM, 另外五种是省电模式 LPM 0~LPM 4。所有这些工作模式可以通过 SCG0、SCG1、OscOff、CPUOff 等四个控制位的组合来选择。

不同的工作模式对应的典型的电流消耗如图 3-7 所示。

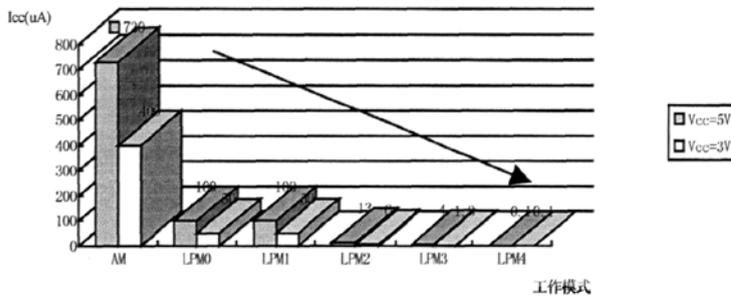


图 3-7 不同模式对应的典型的电流消耗

Fig3-7 Typical Current Consumption of Devices vs. Operating Modes

对于各种外围模块和 CPU 的活动状态, 通过选择适当的低功耗模式、选择停止外围模块的部分运行, 或者将它们整个的停止运行等方法来控制。用根据应用需求设计的软件, 有多种途径来组成最低电流消耗的系统。

### 3.3.4. 12 位 A/D 转换器 ADC12

ADC12 为逐次逼近型的 12 位分辨率 A/D 转换器。高 2 位由电阻网络获得, 低 10 位由电容网络获得。内建采样保持电路, 高速采样可达 200K 次/秒的采样率, 有 8 个外部通道, 4 个内部通道, 其中 A10 连到片内温度传感器可做测温使用, 具有多种可选的参考电压, 可外接或内接, 内部有 1.5V、2.5V 两种精确参考电压可选。而且有多种采样方式可以选择, 可单通道采样, 也可多通道循环采样。内部包含丰富的采样转换所需的时钟源可选, 以配合所需的耗电状态, 有丰富的寄存器保存转换结果与控制采样转换。ADC12MEM0~ADC12MEM15 自动保存相应通道的转换结果, ADC12CTL0~ADC12CTL15 存放采样通道号参考电压选择以及序列标



硬件乘法器有两个存放操作数的 16 位寄存器和三个存放相乘结果的寄存器。当第一个操作数写入相应的寄存器时乘法类型即被确定，当第二个操作数写入寄存器时乘法运算立即开始，并在用户查询运算结果之前结束。

两个操作数 OP1 和 OP2 均有各自的寄存器，其中 OP1 可以用 3 种不同的地址访问同一寄存器，但是不同的地址决定了不同的乘法运算类型（有符号乘法、无符号乘法或有符号数乘加）。乘法运算的结果位于两个寄存器中，分别是结果高字位寄存器 RESHI 和结果低字位寄存器 RESLO。结果扩展寄存器 SUMTEXT 中保存有符号 16 位×16 位乘法的符号或是乘加运算的结果的溢出。

### 3.3.6. Timer\_A/ Timer\_B

Timer\_A 有一个 16 位计数器和三个捕获/比较寄存器，Timer\_B 有 7 个捕获/比较寄存器。定时器的时钟源可以从外部时钟 TACLK (SSEL=0 或 3)、内部时钟源 ACLK (SSEL=1)或 SMCLK (SSEL=2)中选择。时钟源可以被 1, 2, 4 或 8 分频。比较/捕获寄存器可以通过程序来确定工作在捕获模式下还是比较模式下。捕获模式主要通过上升沿、下降沿以及上升沿和下降沿的结合使用来单独测量外部事件。比较模式主要用于为程序和硬件产生定时时间或者脉宽调制信号。每个捕获/比较寄存器都有一个输出模块，该模块可以独立行使比较功能，也可以通过几种方法来触发。

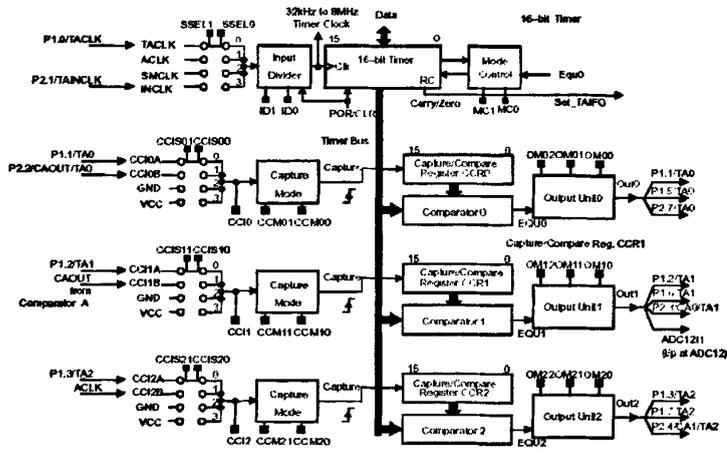


图 3-10 MSP430F149 的 Timer\_A 的原理图

Fig3-10 MSP430F149's Timer\_A Block Diagram

### 3.3.7. I/O 端口

MSP430F149 有 6 个 8 位 I/O 口：P1~P6。其中，P1 和 P2 使用 7 个控制寄存器，而 P3、P4、P5、P6 只有用到其中的 4 个控制寄存器。这些 I/O 端口对于数字的输入输出有着极大的灵活性：

- 所有的 I/O 端口都是独立可编程的。
- 可以有各种输入、输出和中断条件的组合。
- P1 和 P2 的 8 位可以充分实现外部事件的中断。
- 可以使用所有指令对所有寄存器进行通过读/写操作。

### 3.3.8. 看门狗 (WDT)

看门狗定时器 (WDT Timer) 的主要功能是当程序发生错误时执行一个受控的系统重新启动。如果超过了选定的时间, 则系统将复位。如果应用中不需要此功能, 那么可以把它当成定时器, 当选定的定时时间达到后将产生中断。

## 第四章 硬件系统电路设计

### § 4.1 测试系统的硬件电路设计

本系统应用计算机的 Printer 口作为信号接口, 应用一片串行通信 A/D 与传感器及滤波器相连接, 加上一个可控的稳压电源构成一个完整实时的测量仪, 其中包括传感器部分、滤波电路部分、数据采集部分和接口部分。其系统设计原理框图见图 4-1, 这里提供的仅仅是系统原理的大致框架图, 说明了系统的结构和各部分大致功能, 详细的电路设计请参见本章节后的图 4-17 和图 4-18。

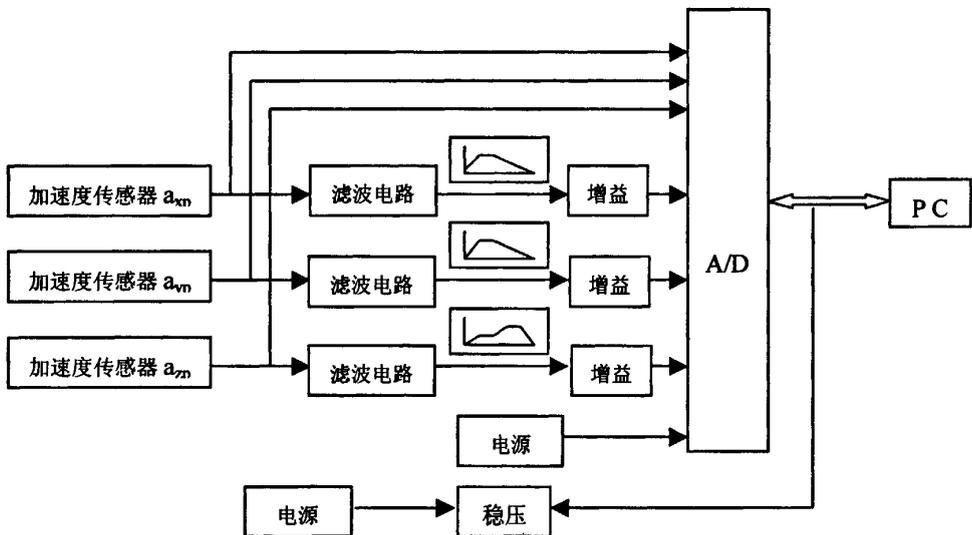


图 4-1 测试系统结构框图

Fig4-1 The Frame of Measurement System

传感器我们采用第二章已经阐述过 XL05 加速度传感器, 滤波电路采用 Wd—Wa 与 Wb—Wa 滤波器电路, 这在本章节的后面介绍。A/D 采用高速串口器件 TLC2543, 采样率为 63Ks/S, 精度为 8 位 (1/256) 或 12 位 (1/4096), 共有 11 个通道口。设计成三个不加滤波的通道和三个加生理滤波的通道, 其余通道用于电池电压、工作电压、参考电压、地电压等的监视。若发生电池电量不足时, 可通过软件进行预报警, 当发生临界低电压或电压短路故障时, 稳压器会自动进入自保护, 并向计算机送出报警, 实际电路设计见图 4-2。由于采用低功耗设计——低功耗器件和软件电源自动管理, 故四节 5 号电池一般可以使用 30 小时。

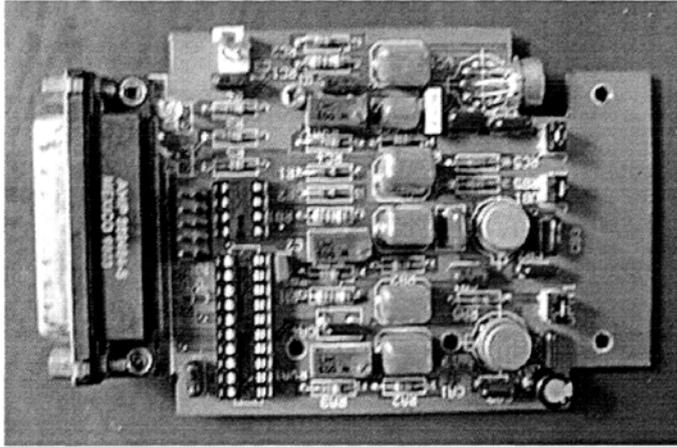


图 4-2 测试系统印刷线路板设计图  
Fig4-2 The PCB Design of Measurement System

#### 4.1.1 滤波系统

UIC513 标准中对振动信号的滤波处理提出了二种方法：模拟加权滤波和数字加权滤波，以及四幅滤波曲线  $W_a$ 、 $W_b$ 、 $W_c$ 、 $W_d$ 。

其中  $W_a$  用于磁带记录仪的带通处理；

$W_b - W_a$  用于地板及座椅 Z 向带通处理；

$W_c - W_a$  用于椅靠背 X 向带通处理；

$W_d - W_a$  用于地板 X,Y 及座椅面的 Y 向带通处理。

并明确规定在标称频带范围的总公差应低于  $\pm 0.5\text{dB}$ ，在标称频带处的公差小于  $\pm 1\text{dB}$ ，标称频带处一倍频衰减可达无穷大，但不小于  $12\text{dB/倍频程}$ 。

本研究对模拟滤波技术进行了较深入的研究，并应用现代电子技术和软件技术完成了满足此方法的应用设计。

模拟加权滤波器由一个、两个或多个转折频率十分接近的滤波器组合而成。且工作在低频段，用于人体受振信号处理，又称生理滤波器。用一般的带通滤波电路很难满足规定的技术要求，本研究采用了多个二阶电路的组合方式。如对  $W_a - W_b$  阶梯型生理滤波器，采用了如图 4-3 的结构。

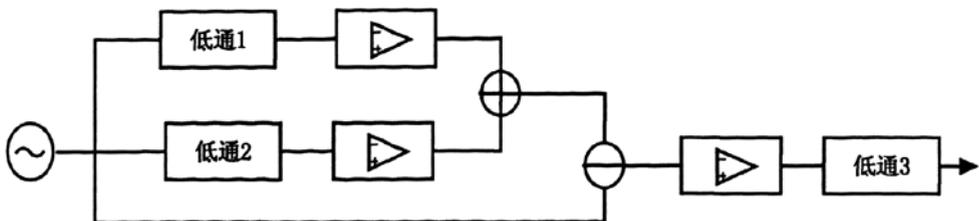


图 4-3 Z 向生理滤波器框图  
Fig4-3 The Frame of Physiology Filter of Z

其滤波的原理可由组图 4-4 表示:

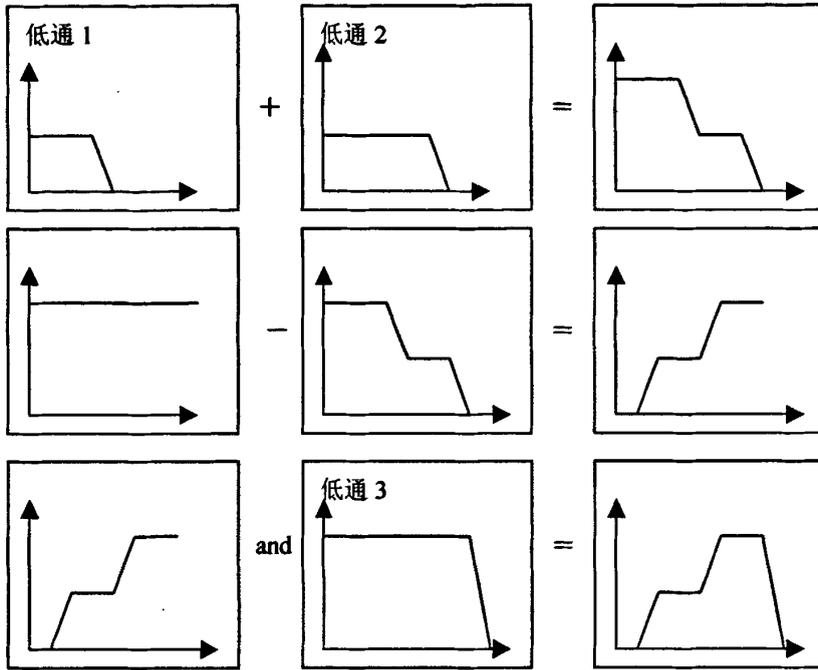


图 4-4 滤波的过程原理框图

Fig4-4 The Frame of Filter Theory

单个二阶低通电路见图 4-5, 它是 RC 式正反馈式二阶有源 LPF, 这里的 RC 是共同占有的“兼容式”, 称为“Sallen and key 滤波器”。其特性是在远高于  $f_c$  的区域是二阶 LPF 特性区衰减度为 12dB 倍频程, 在  $f_c$  附近存在有源 BPF 的 Q 质所决定的尖峰。可用式 4-1 表示其传递函数:

$$T(s) = \frac{G \omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q} s + \omega_0^2} \quad (4-1)$$

$$|T(j\omega)| = \frac{G \omega_0^2}{[\omega^2 - (2 - \frac{1}{Q^2})\omega_0^2 \omega^2 + \omega_0^4]^{\frac{1}{2}}} \quad (4-2)$$

$$\Phi(\omega) = -\text{tg}^{-1}[2Q \frac{\omega}{\omega_0} + \sqrt{4Q^2 - 1}] - \text{tg}^{-1}[2Q \frac{\omega}{\omega_0} - \sqrt{4Q^2 - 1}] \quad (4-3)$$

$$\tau(\omega) = \frac{2Q \sin^2 \Phi}{\omega} - \frac{\sin 2\Phi}{2\omega} \quad (4-4)$$

其中  $G = (1 + R_b/R_a)$  (4-5)

$$Q = \frac{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}{C_2(R_1 + R_2) + (1 - G)R_1 C_1} \quad (4-6)$$

$$\omega_0 = 1/\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2} = 2\pi f_c \quad (4-7)$$

由此可见用 RC 值确定各自的转折频点  $f_c$  和品质因素 Q 值，并通过负反馈调节各自的放大倍数 K 值，就可以构成精度很高的低通滤波器。

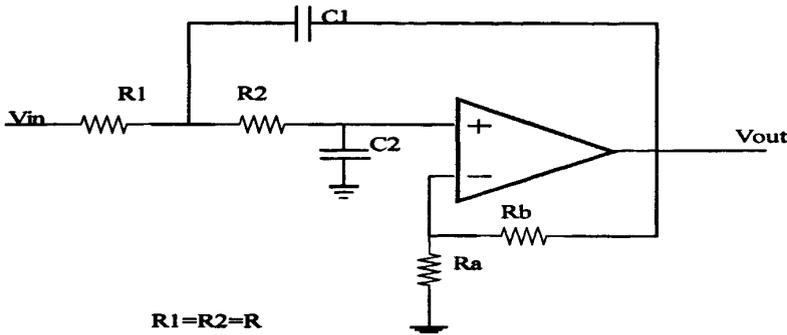


图 4-5 典型二阶低通滤波电路  
Fig4-5 The Typical Second Order LPF Circuit

设  $G=1$ 、 $R_1=R_2=R$ ，其计算参数为

品质因素： $Q=0.5*(C_1/C_2)^{0.5}$

转折频率： $f_c=[2\pi R(C_1*C_2)^{0.5}]^{-1}$

放大系数： $K=-R_b/R_a$

为了取得标称频带内有平坦且在转折频点  $f_c$  后出现较大的衰减度，可采用“巴特沃兹”(Butterworth) 特征滤波器，其 Q 值在 0.71 左右。UIC513 标准对各个滤波器皆提出了具体的 Q,  $f_c$ , K 要求，具体见表 4-1:

表 4-1 UIC513 标准对各个滤波器要求  
Table4-1 The Requirements of Filters in UIC513

| 计权曲线  | 频率范围          |               |       | 计权曲线的各项系数值    |               |               |               |       |       |       |     |
|-------|---------------|---------------|-------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------|-------|-------|-----|
|       | $f_1$<br>(HZ) | $f_2$<br>(HZ) | $Q_1$ | $f_3$<br>(HZ) | $f_4$<br>(HZ) | $f_5$<br>(HZ) | $f_6$<br>(HZ) | $Q_2$ | $Q_3$ | $Q_4$ | K   |
| $W_a$ | 0.4           | 100           | 0.71  | —             | —             | —             | —             | —     | —     | —     | —   |
| $W_b$ | 0.4           | 100           | 0.71  | 16            | 16            | 2.5           | 4             | 0.63  | 0.8   | 0.8   | 0.4 |
| $W_c$ | 0.4           | 100           | 0.71  | 8             | 8             | —             | —             | 0.63  | —     | —     | 1.0 |
| $W_d$ | 0.4           | 100           | 0.71  | 2             | 2             | —             | —             | 0.63  | —     | —     | 1.0 |

表 4-2 是 UIC513 标准提出的滤波曲线精度要求:

表 4-2 滤波器线性参数标准  
Table4-2 The Linear Parameters of Filters

| 频率范围<br>滤波器                | 衰减量 | $\sim\infty$<br>( $\leq 2^{-1}f_1$ ) | $\pm 1\text{dB}$<br>( $2^{-1}f_1 \sim 2^{-1/3}f_1$ ) | $\pm 0.5\text{dB}$<br>( $f_1 \sim f_4$ ) | $\pm 1\text{dB}$<br>( $2^{-1/3}f_4 \sim 2f_2$ ) | $\sim\infty$<br>( $\geq 2f_2$ ) |
|----------------------------|-----|--------------------------------------|--|--|---|---------------------------------|
| 垂直方向<br>( $W_a \sim W_b$ ) |     | 0~0.2                                | 0.2~0.32   | 0.4~16                                   | 20.16~100                                       | $\geq 200$                      |
| 水平方向<br>( $W_a \sim W_d$ ) |     | 0~0.2                                | 0.2~0.32   | 0.4~2                                    | 2.52~100  | $\geq 200$                      |
| 纵向方向<br>( $W_a \sim W_c$ ) |     | 0~0.2                                | 0.2~0.32   | 0.4~8                                    | 10.08~100                                       | $\geq 200$                      |

然而, 实验表明若简单地按 UIC513 提供的参数表进行滤波器设计, 则会造成很大的误差。主要原因是几个频率转折点很接近时各个非线性的滤波曲线叠加造成最终的失真。项目组对具体电路的所有元件的作用进行了很细致的研究, 了解了每个元件参数的变化对滤波效果的影响, 确定了  $W_a$ ,  $W_b - W_a$ ,  $W_c - W_a$  和  $W_d - W_a$  的相关电路设计, 并获得能够满足 UIC513 技术要求的滤波曲线。仿真结果分别如曲线图 4-6、图 4-7、图 4-8 和图 4-9 所示:

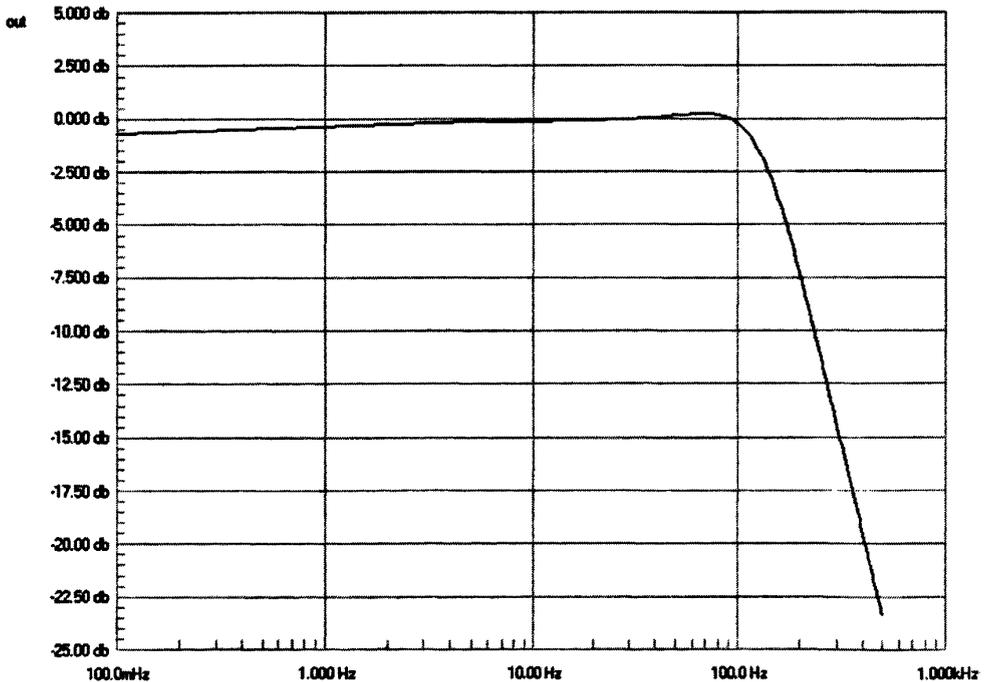


图 4-6  $W_a$  的仿真曲线

Fig4-6  $W_a$  Frequency Simulation Curve

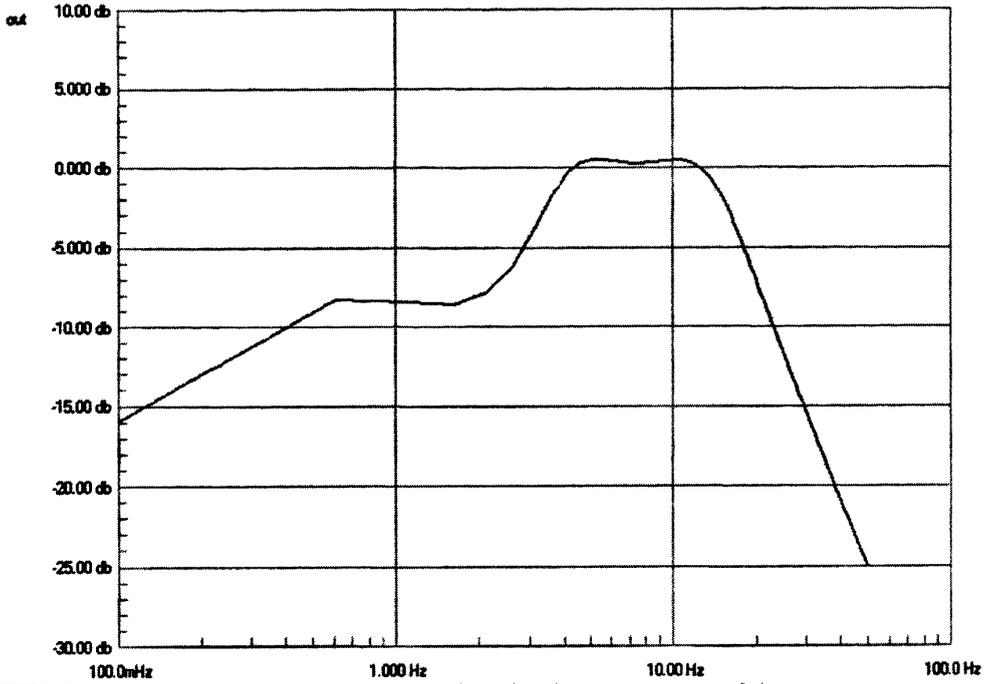


图 4-7 Wb-Wa 仿真曲线  
Fig4-7 Wb-Wa Frequency Simulation Curve

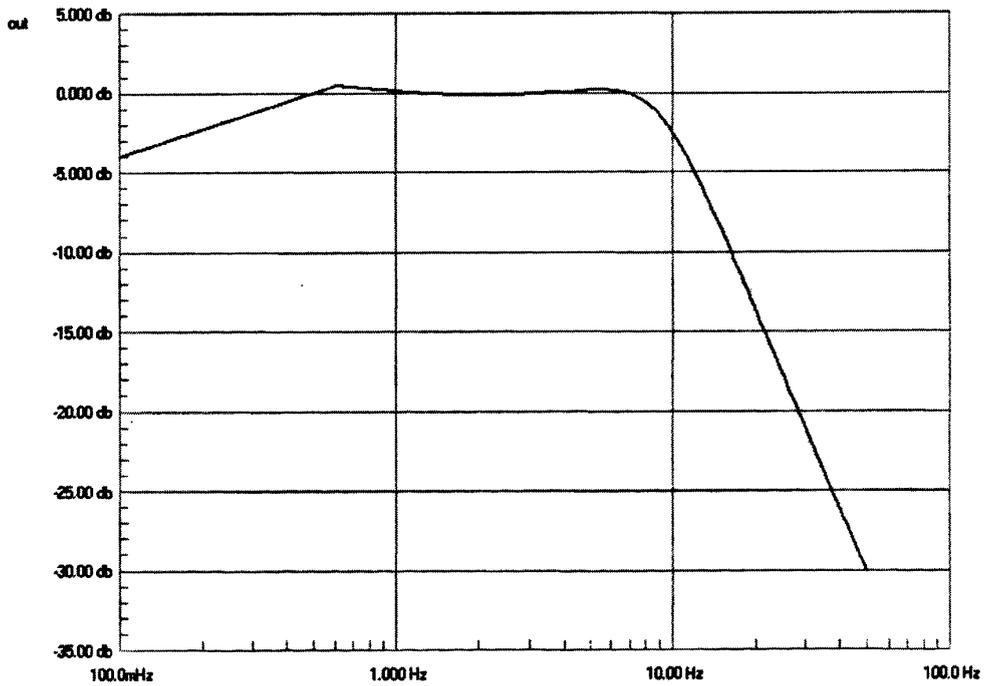


图 4-8 Wc-Wa 仿真曲线  
Fig4-8 Wc-Wa Frequency Simulation Curve

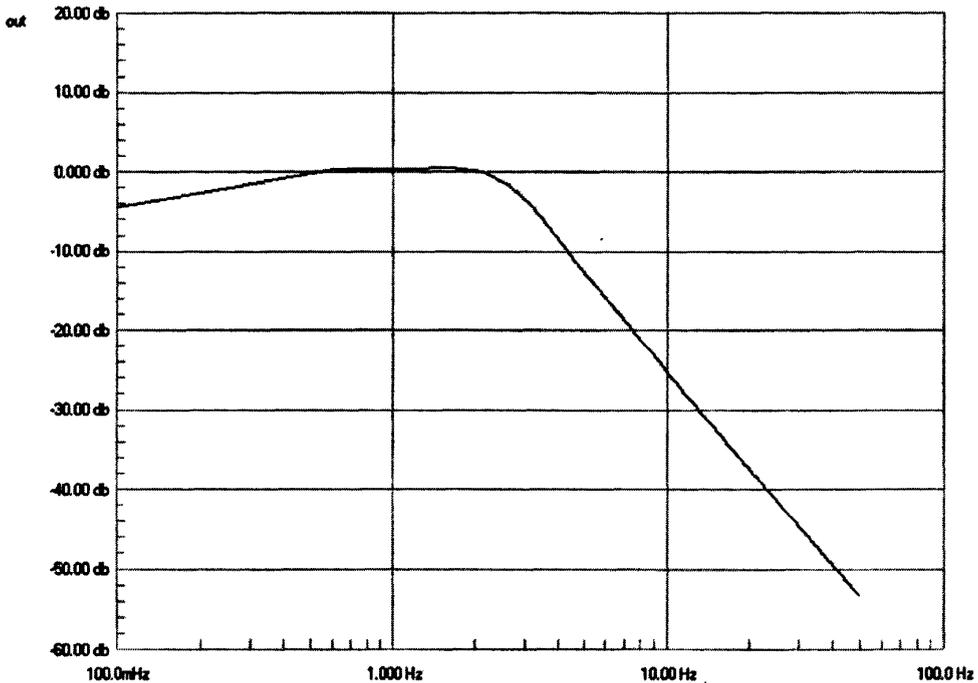


图 4-9 Wd-Wa 仿真曲线

Fig4-9 Wd-Wa Frequency Simulation Curve

以上结果表明，采用二阶有源滤波组合电路，可以满足 UIC513 标准的要求，其计算结果已用于 SSD-J-1 测量仪，取得了良好的效果。

#### 4.1.2 电源管理系统

电源管理系统是任何系统不可忽略的部分，因为它涉及到元器件的使用寿命以及系统的可维持时间，由于我们设计的硬件系统采用 5V 系统，所以采用 TPS7250 稳压器，具体电路设计如图 4-10。由于它和一般 LDO 稳压器相比有特别低的落差电压和静态电流（在负载电流为 100mA 时最大落差电压为 85mV，静态电流最大值为  $0.5\mu\text{A}$  ( $T_J=25^\circ\text{C}$ )）、微功耗工作和小型化封装的优点，所以可以大大延长系统电池的工作寿命，另外它的小外型集成电路（SOIC）封装最适合于低成本和电路板空间较重要的设计。

TPS7250 包括一个电源状态检测功能，图中的 2 脚 PG，它用于报告输出电压低于正

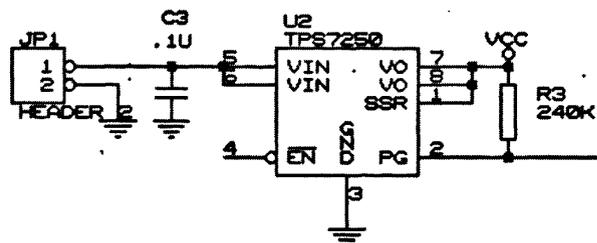


图 4-10 电源系统设计电路

Fig4-10 The Circuit of Power System

常稳压值（95%），可以执行上电复位或电池电压过低指示功能。

#### 4.1.3 数据采集系统

在数据采集系统中模数转换器为核心器件，采集后的模拟信号需要经过 A/D 转换后才能进行数据处理，它的转换精度直接影响着计算的结果。目前模数转换器的种类很多，有积分式、双积分式、逐次逼近、闪速等结构，其中逐次逼近转换器（SAR）应用广泛。我们采用的 A/D 芯片是 TLC2543，它就是 12 位开关电容逐次逼近模数转换器，故在此作具体介绍。逐次逼近寄存器结构可用于性能要求广泛变化的场合，有的是为速度优化，而有的是为低功耗而优化，因此它可以应用在从几百赫兹到几千赫兹的范围内。在逐次逼近结构中，模拟输入信号被逐次用与同一个转换运算规则控制的数模转换器（DAC）产生的输出相比较，即开始时模拟输入信号与 DAC 被置于半量程时的输出进行比较为开始，此时的最高有效位（MSB）被置成 1，而其他位被置成 0，若发现输入比 DAC 半量程低，则 MSB 被复位为 0，将输入信号再同四分之一 DAC 量程进行比较，大于则 MSB 的下一位为 1，反之为 0；若发现输入信号比 DAC 半量程大，则 MSB 保持高电平，而再与四分之三量程比较，比较结果同上述处理相同，直至所有位均参与了比较。

当我们选择 A/D 转换器的时候，还要明确它的几个重要性能指标，这样才能选出最优化的、最经济的转换器。

1. 分辨率 A/D 转换器的分辨率表明了能够分辨最小的量化信号的能力。通常用输出的二进制数码表示，位数越多，量化误差越小，分辨率越高。假设输入电压位  $V_{pp}$ ，要使量化的间隔位  $\Delta V_{pp}$ ，所需的位数为  $n$ ，则有：

$$2^n \geq V_{pp} / \Delta V_{pp} \quad (4-8)$$

UIC513 标准中规定了最小分辨率位  $0.03\text{m/s}^2$ ，最大测量范围为  $50\text{m/s}^2$ ，如果采用传感器最大测量范围为  $\pm 50\text{m/s}^2$ ，最小分辨率为  $0.025\text{m/s}^2$ ，通过计算得出量化的点数至少为 4000，即需要 12bit 的转换器（ $2^{12}=4094$ ）。

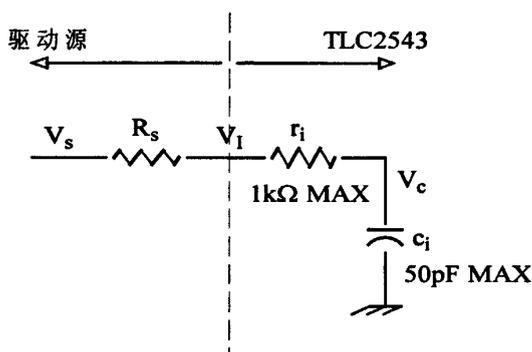
2. 精度 由于转换器同时涉及到模拟和数字系统，所以要同时考虑模拟误差和数字误差两部分，为了便于处理，通常把两个部分分开处理。模拟误差主要集中在比较器的直流转化点变化上，而数字误差是由系统的分辨率来决定的。一般上来讲把转换器的模拟误差和数字误差的大小视为同一个数量级，而总的误差为这些误差的累加值。测量系统中，测量的满量程为  $100\text{m/s}^2$ ，按照转换器 1bit 的误差，则最小分辨率为  $0.0244\text{m/s}^2$ ，优于  $0.03\text{m/s}^2$  的要求。

3. 转换速度 转换速度用完成一次转换所用的时间来表示，即从转换控制信号加入开始直至输出端得到稳定的数字输出为止的这段时间。转换的时间长则表示转换的速率低。本课题设计的测试系统需要采集 7 个通道的数据，根据采样定

理为了避免混频现象，采样的频率必须大于或者等于采集信号的最高频率的两倍，所以采用的采样率必须大于 400sps 以上，当采用 7 个通道扫描采样方式是 A/D 转换器的转换速度至少为  $7 \times 400 = 2800\text{sps}$ ，如果考虑三个不同方位的同时采集数据，则要求转换速率为 8400sps，即要求大于 10ksps 的转换速率可以满足实验要求，而我们采用的 TLC2543 提供的最大采样速率为 66Ksps，供电电流仅需 1mA（典型值），满足了我们采样速率的要求。

而且 TLC2543 有三个控制输入端：片选 (/CS)，输入/输出时钟 (I/O CLOCK) 以及地址输入端 (DATA INPUT)，可以通过一个串行的 3 态输出端与主处理器或其外围的串行口通讯。除了高速的转换器和通用的控制能力外，它还有一个片内的 14 通道多路器可以选择 11 个外部输入或 3 个内部自测试 (self-test) 电压中的任何一个，而且具有自动采样-保持功能。在转换结束时，“转换结束” (EOC) 输出端变高以指示转换的完成。另外它和 SPI 接口可以无缝连接，还可以将 TLC2543 和传感器放在远端和处理器长距离通信，节省通信接口、易于隔离干扰。

另外我们还可以对 TLC2543 进行以下的简化模拟输入分析，它的等效电路见图 4-11，在 1/2LSB 中将模拟输入电容从 0 充到  $V_s$  所需的时间推导如下：



$V_i$  = 输入端 A0-A10 的输入电压  
 $V_s$  = 外部驱动源电压  
 $R_s$  = 源电阻  
 $r_i$  = 输入电阻  
 $C_i$  = 输入电容

图 4-11 包括驱动源的等效输入电路  
 Fig4-11 Equivalent Input Circuit Including the Driving Source

$$V_c = V_s (1 - e^{-t_c / R_i C_i}) \quad (4-9)$$

其中

$$R_i = R_s + r_i \quad (4-10)$$

1/2LSB 达到的最终电压由下式给出：

$$V_c (1/2 \text{ LSB}) = V_s - (V_s / 8192) \quad (4-11)$$

将式 4-11 代入式 4-9 并解出  $t_c$  如下：

$$V_s - (V_s / 8192) = V_s (1 - e^{-t_c / R_i C_i}) \quad (4-12)$$

$$t_c(1/2LSB) = R_i \times C_i \times \ln(8192) \quad (4-13)$$

在给定值的条件下模拟信号的建立时间是：

$$t_c(1/2LSB) = (R_s + 1K\Omega) \times 60pF \times \ln(8192) \quad (4-14)$$

这个时间必须少于 A/D 转换器的采样时间。

#### 4.1.4 GPS

由于测试系统需要对行驶列车的位置、速度和行驶里程进行判断，因此在系统中引进美国 GARMIN 公司研制的 GPS12C，该机型具有定位速度快、动态性能好，抗遮蔽性能强、低噪声、高精度，不论在高楼林立的城市或车辆、飞机内的舷窗处，均能敏锐地捕捉信号、快速定位。而且该机型体积小、功耗低，四节碱性电池可连续工作 20 小时以上。利用它可以记录列车行驶的时间、经纬度、速度和里程，为今后的分析提供依据，试验中具体采集的数据如表 4-3 所示。

表 4-3 GPS 采集的数据表

Table4-3 The Data Table Sampled with GPS

| 文件号 | 序号 | 时间       | 纬度(N)    | 经度(M)     | 速度(Km/h) | 里程   |
|-----|----|----------|----------|-----------|----------|------|
| 1   | 1  | 10:42:00 | 31.07907 | 121.27178 | 102      | 32.9 |
| -   | 2  | 10:43:00 | 31.06947 | 121.27178 | 103      | 34.6 |
| -   | 3  | 10:44:00 | 31.0531  | 121.27178 | 102      | 35.5 |
| -   | 4  | 10:45:00 | 31.04642 | 121.27178 | 102      | 37.6 |
| -   | 5  | 10:46:00 | 31.04021 | 121.27178 | 102      | 39   |
| -   | 6  | 10:47:00 | 31.03572 | 121.27178 | 102      | 41.2 |
| 2   | 1  | 10:48:00 | 31.03004 | 121.27178 | 102      | 43   |
| -   | 2  | 10:49:00 | 31.02214 | 121.26926 | 99.6     | 44   |
| -   | 3  | 10:50:00 | 31.01674 | 121.26556 | 102      | 46.3 |
| -   | 4  | 10:51:00 | 31.01011 | 121.26121 | 99       | 47   |
| -   | 5  | 10:52:00 | 31.00332 | 121.25498 | 49.6     | 49.6 |
| -   | 6  | 10:53:00 | 31.00006 | 121.24638 | 50.7     | 50.9 |
| 3   | 1  | 10:54:00 | 31.00048 | 121.21739 | 52.9     | 51.9 |
| -   | 2  | 10:55:00 | 31.00085 | 121.21432 | 8.7      | 52.3 |

## § 4.2 测试仪的硬件电路设计

根据铁路部门的要求,在原有测试系统的基础上利用模拟电路滤波和单片机数据处理开发智能型液晶显示振动测试仪,此测试仪仍然采用简单法的设计要求,选择 TI 公司最新推出的混合信号微处理器 MSP430F149 作为主芯片,其功能已经在前面的章节已经介绍,具体的系统设计参见图 4-12。

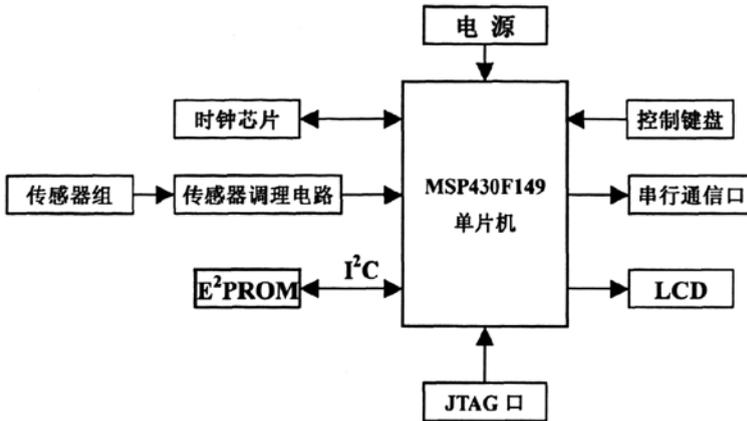


图 4-12 测试仪结构框图

Fig4-12 The Frame of Measurement Equipment

该系统的实际电路设计如图 4-13,从图中可以看出我们采用的元器件大部分为贴片式器件,这样大大节省了成本以及电路板设计尺寸,达到减小体积的目的,并且设计有 JTAG 接口,可以对单片机进行读写操作。

### 4.2.1 滤波系统

在前面我们已经介绍了采用放大器电路设计的滤波电路,这里我们采用了专用滤波元器件 TLC04,它是以参考频率为基准实现规定的不同滤波要求,滤波的原理同前面的章节所述,电路设计简单方便,十分适合便携式仪器的开发。注意的是它需要参考频率,这里我们采用 4060,它应用分频技术实现不同频段的需求。

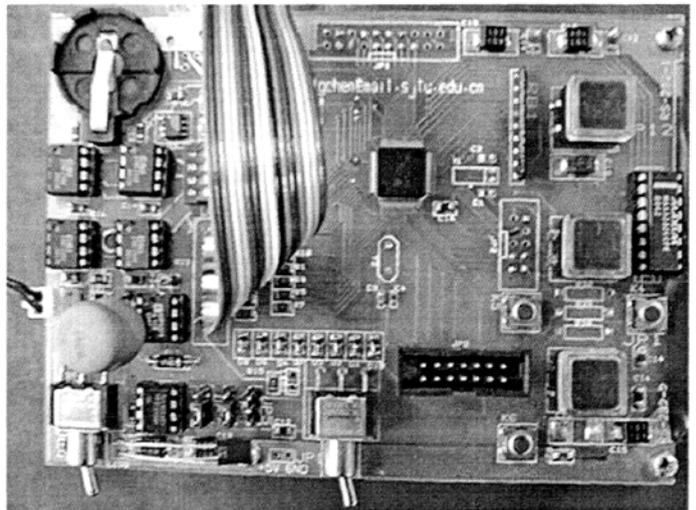


图 4-13 测试仪印刷电路板设计图

Fig4-2 The PCB Design of Measurement Equipment

#### 4.2.2 虚地电路

由于我们在设计中采用 5V 单电源供电的调理电路，为了使采集的信号零点值提升到 2.5V，我们使用 2.5V 的基准电压作为滤波电路部分模拟信号的接地端。综合考虑我们使用了 TLE2425 精密虚地产生器。由于 TLE2425 是把低功耗精密电压基准源同高性能精密运算放大器集成到单个硅片上，所以同传统的电路方案相比，使用 TLE2425 可以增加信号的动态范围，提高信噪比，降低失真，改善信号的精度，并且容易和 ADC 或 DAC 接口。并且它改善了当输入电压和负载变动时输出电压的稳定性，降低了输出阻抗和功耗，稳定性能超过单 5V 系统的 12 位精度要求。

#### 4.2.3 电源管理系统

由于此系统包含两种不同供电系统的部分，所以需要 3.3V 和 5V 两种电源，我们应用 ADP1073 DC-DC 电荷泵升压稳压电路，由两节 5 号电池 (1.6V~3.2 V) 供电获得稳定的 5V 电源，再应用 TPS7233 稳压电路对 5V 降压获得 3.3V 电源，该电路结构简单、稳定可靠，2 节 5 号碱性电池对带有背景光 LCD、电流为 80mA 的小系统可连续工作 8 小时以上，具体设计电路见图 4-14 所示。

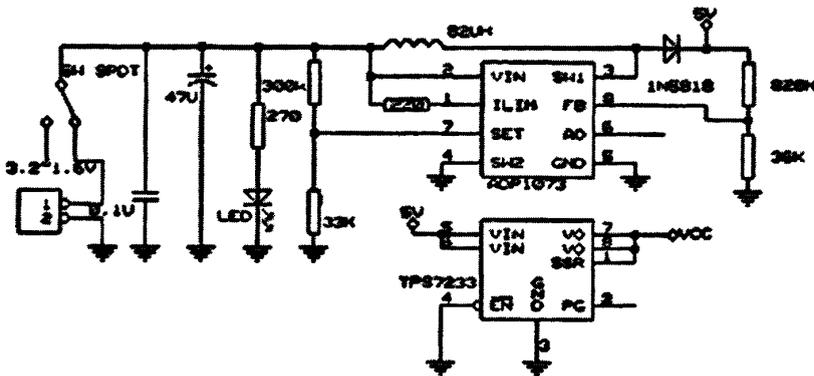


图 4-14 3.3V 和 5V 电源的应用电路

Fig4-14 The Circuit of 3.3V and 5V Power System

#### 4.2.4 A/D 口

本系统中模拟输入信号是系统所要处理的信号。我们选取了复用的 I/O 口 P6 口作为 A/D 信号的输入通道。虽然在振动信号测量系统中一般的测量只需要三个 A/D 通道即可，但是考虑到系统的实用性（电源报警、原始信号采集等）与扩展兼容性，我们开发了 8 个 AD 通道，以满足用户的最大需要。

#### 4.2.5 键盘和 LCD

人机界面是便携式系统的重要组成部分，它要求控制面板简单，指令明确，表达丰富、确切，体积小，功耗低。因此我们为本系统配置了 LCD 显示器接口。本系统的 LCD 显示器包括字符点阵型和图形符号型两种。其中 P5.0~P5.7 和 P4.0~P4.3 构成字符点阵 LCD 显示的接口。可以满足 3.3V 多行 LCD 模块的应用，另外由 P5.0~P5.7 和 P4.0~4.5 构成了点阵式图形模块接口。这两个接口可以满足目前大多数 LCD 的接法要求。

目前显示系统大多采用的是通用字符式 LCD，在满足条件的基础上节省了开发时间和成本，我们所采用的是 16×4 的液晶显示器。但是在以往的设计中单片机和外围的设计大部分均是 5V 系统，而随着电子技术的发展，超低功耗的芯片越来越多，在此基础上提出了 5V 系统和 3.3V 系统共用技术，从表 4-4 中可以看出字符式 LCD 与 MSP439F149 相互之间的电平存在着很大的差异，这种电平的差异直接影响到 LCD 对芯片发出指令的响应，反之过高的 LCD 反馈电压可能超过 MSP439F149 所能承受的最高电压，对芯片造成不可预计的损坏，因此我们的电路设计（如图 4-15）采用限流嵌位的方法。

一般 LCD 的驱动电流最大不会超过 13  $\mu$  A，所以通过 180  $\Omega$  电阻后下降了的电压仍可以驱动 LCD，同时也解决了限流问题，而且通过 3.6V 嵌位二极管保证 MSP439F149 端口所承受的电压不会超过极限值，实现了单片机到 LCD 的电平转换，满足了 LCD 高低电平的要求。

表 4-4 MSP430 与 LCD 电平的对比  
Table4-4 The Contrast of Level between  
MSP430 and LCD

|        | Vcc |                 | MIN | MAX   | UNIT |
|--------|-----|-----------------|-----|-------|------|
| MSP430 | 3.0 | V <sub>OH</sub> | 2.4 | ~ 3.0 | V    |
|        |     | V <sub>OL</sub> | 0   | ~ 0.6 |      |
| LCD    | 5.0 | V <sub>IH</sub> | 2.2 | ~ 5.0 | V    |
|        |     | V <sub>IL</sub> | 0   | ~ 0.6 |      |

电路中利用 MSP430F149 的 P4.4、P4.5、P4.6 作为 LCD 中 E、R/W、RS 的控制线，P5 口作为 LCD 数据线。由于此系统是数据采集系统中的显示部分，它要对不同的中断和按键产生响应以显示相应的内容，所以设计了三个按键分别对应进入键、移动键和退出键。电路还采用了上电自动复位的设计结构供开机和复位时使用。MSP430F149 除了内部有 DCO 数控晶振可以提供工作频率外，还有两个外部时钟接口，分别可接低速和高速时钟，这样为系统的不同模块提供了不同的稳定工作频率，我们在系统设计中分别选用 32.768KHz 手表晶振（可以作为独立外围模块的时钟源或者用于稳定 DCO）和 4.096M 晶振（可以作为系统的主频备用）。

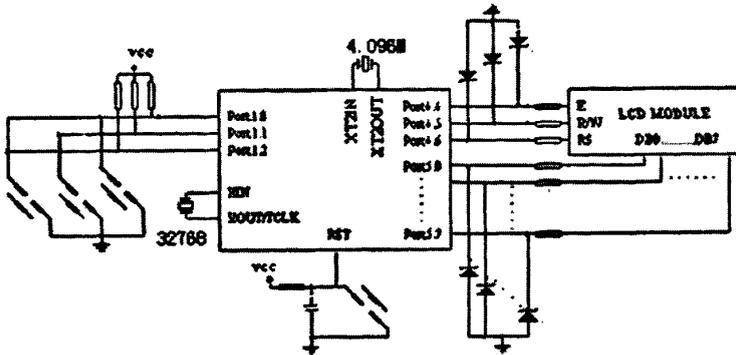


图 4-15 LCD 显示系统应用电路  
Fig4-15 Circuit of the LCD Display System

#### 4.2.6 EEPROM

虽然 MSP430F149 自身也提供了内部存储器来存储一些数据，但是其存储容量不是很大（RAM=2K，ROM=60K 包含程序代码部分），而我们在一次测试中可能列车行驶的距离很长，需要记录的数据量很大，所以我们采用外部扩充 ROM 的技术以达到要求。而 EEPROM（电可擦写存储器）是用来存储系统工作过程中的一些重要参数以确保系统关闭之后这些数据能被保存下来的通用元件，所以我们在本系统中引入了 4 个 EEPROM，用以扩展系统的存储量。

本系统采用了 256K 位 I<sup>2</sup>C 串行 EEPROM-CAT24WC256，它内部含有 32768 个字节，采用的是 CMOS 技术，从而减少了器件的功耗，另外 CAT24WC256 还有一个 64 字节的页写缓冲器，该器件通过 I<sup>2</sup>C 总线接口进行操作。在本系统中，4 个 EEPROM 分别与单片机的 P3.0~P3.3 口相连接，并可以从系统时钟芯片 X1243 中读取系统时间。

#### 4.2.7 系统时钟

为了方便和准确的记录测试时间，本系统中采用了 Xicor 的 X1243 作为系统的时钟。X1243 是带时钟/日历和两个闹钟（报警）的实时时钟。双端口时钟和报警寄存器保证时钟即使在读写操作时也能够精确工作。时钟/日历可以通过一组寄存器进行控制和读出。而且它使用低成本的 32.768KHZ 的晶体、2 个外部电阻和 2 个外部电容构成 RTC 的振荡网络器（如图 4-16），以秒、分、时、日、星期、月和年为单位跟踪时间。并具有闰年校正功能，能对 Y2K 问题和小于 31 天的月自动进行调整。X1243 还具有 2K 字节的 EEPROM 阵列，可以存储关键的

配置和用户数据，即使主电源和后备电源都被破坏，这些数据也不会丢失。

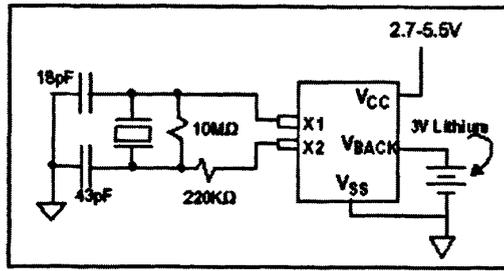


图 4-16 实时时钟振荡网络和电源

Fig4-16 The Real Time Clock Crystal Net and Power Connection

#### 4.2.8 串行通信

考虑到在某些情况下需要把便携仪的数据传输到PC机上储存或者进行处理，本系统设置了两个与微机的通信接口：RS232-1和RS232-2。这两个接口通过MAX3232接口芯片与MSP430相连。

MAX232是一种双组驱动器/接收器，片内含有一个电容性电压发生器，以便在单5V电源供电时提供EIA/TIA-232-E电平。每个接收器将EIA/TIA-232-E电平输入转换为5V TTL/CMOS电平。接收器具有1.3V的典型门限值及0.5V的典型迟滞，而且可以接收±30V的输入。每个驱动器TTL/CMOS输入电平转换为EIA/TIA-232-E电平。由于MSP430F149是3V级器件，因而在本电路中将应用低电压型器件MAX323E为实际器件，其工作原理和封装设计与MAX232一致。

#### 4.2.9 JTAG

JTAG口是用于向单片机中写入编制好的程序的。在这个系统中，MSP430的54~57脚用作JTAG口的连接。

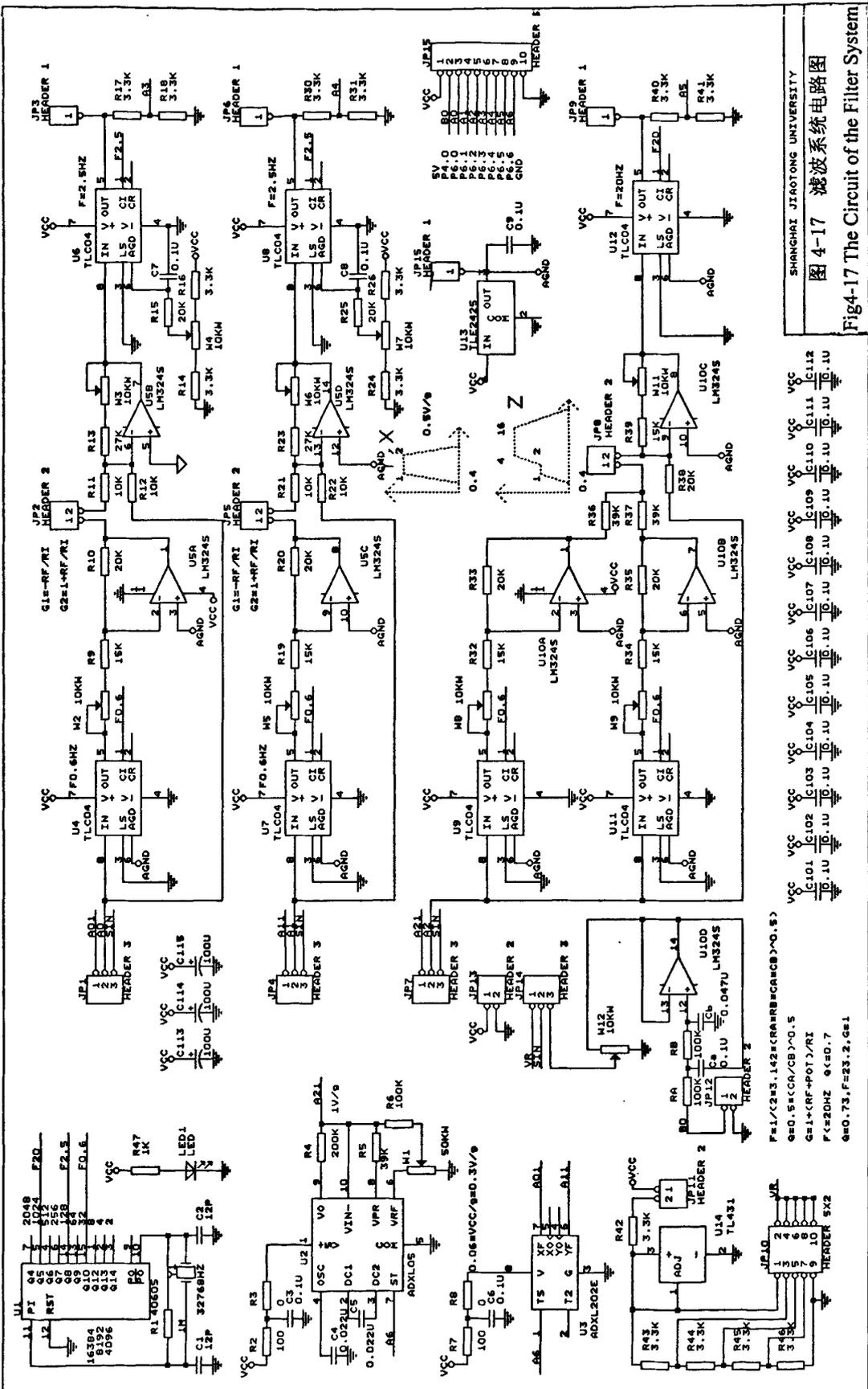


图 4-17 滤波系统电路图

Fig4-17 The Circuit of the Filter System

SHANGHAI JIAOTONG UNIVERSITY

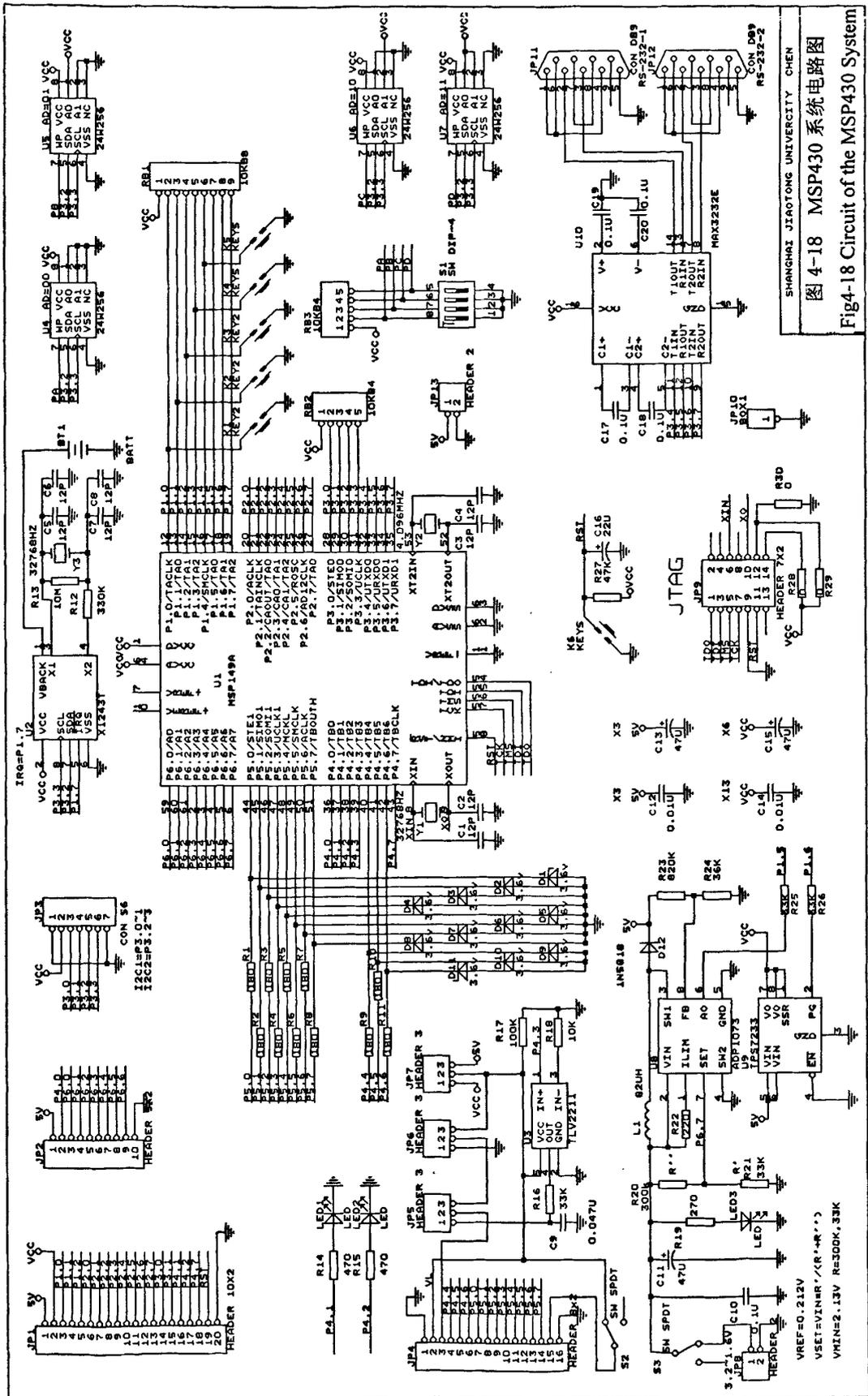


图 4-18 MSP430 系统电路图

Fig-4-18 Circuit of the MSP430 System

## 第五章 软件设计

### § 5.1 测试系统的软件设计

#### 5.1.1 软件流程图

根据 UIC513 标准中的规定,对振动信号进行采集和处理,图 5-1 和图 5-3 是简单法测量系统用于采样和数据处理的软件流程框图。此程序是在 DOS 环境下编写的,能够实时的显示瞬态舒适度值,采集的数据以 Excel 的文件格式全部保存到硬盘上,以供进一步的数据处理。

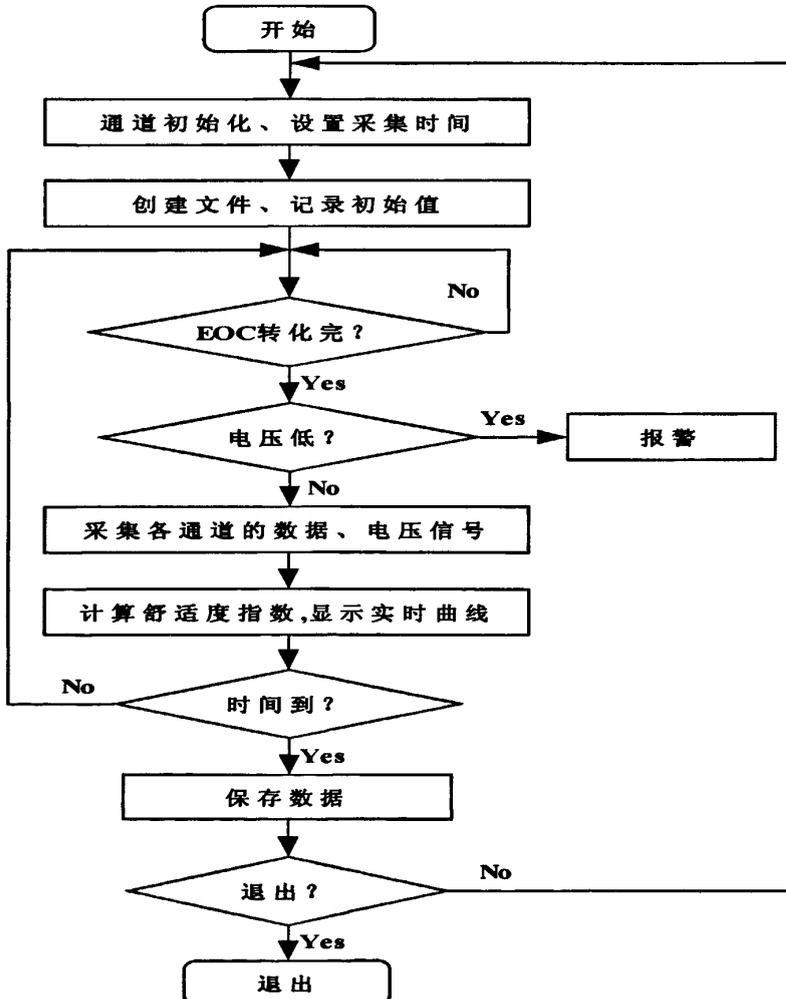


图 5-1 测试系统软件流程图

Fig5-1 Software Flow Diagram of the Measurement System

其中数据采集的部分主要程序如下：

//设置将要进行采集的通道

```

If CHANNEL = PREVCHANNEL Then GoTo 1170 //如果这次通道与上次
//不同的话,做一次空循
PREVCHANNEL = CHANNEL //环,跳到 1280,执行
//后把要采集的通道输
NEWFLAG = 1 //入后,在跳到 1190,
//进行需要通道的采集

If NEWFLAG = 1 Then GoSub 1280

```

1170 GoSub 1190

Return

//检测电源信号,电压低报警

1190 REF = INP(Port + 1) And &H80

If REF <= 0 Then GoTo 1230

LOCATE 13, 5: Print "WARNING : CHANGE BATTER !!!"

1230 For I = 1 To 10

Rem CHECK EOC

X = INP(Port + 1) And &H8 //检测 EOC, 是否转化完毕

If X > 0 Then GoTo 1280

Next

Z(LOOP, CHANNEL) = -1: Return

1280 Z(LOOP, CHANNEL) = 0

For I = 1 To RESOLUTION

If I <= 4 Then X = 2 ^ (4 - I) Else X = 0

X = CHANNEL And X //向 DIN 口输入下一次采集的通道  
// (4 位 D7-D4)

If X > 0 Then Y = 4 Else Y = 0 //检测 CHANNEL 的各位是否为 1,  
//若是,输出 DIN 口 1

OUT Port, PV + Y

Z(LOOP, CHANNEL) = Z(LOOP, CHANNEL) \* 2

X = INP(Port + 1) And &H10

If X > 0 Then Z(LOOP, CHANNEL) = Z(LOOP, CHANNEL) + 1

```

//输出时钟信号
    OUT Port, PV + Y + 2
    OUT Port, PV + Y
    Next
Return
//擦除数组
1420 Rem OUTSIZE
1430 LOOPCOUNT = 0: S1 = 0: S2 = 0
    Erase Z, AD1, AD2
    Return

```

经过测试系统的数据采集、传输、转换以及按照 UIC513 标准中舒适度值的分组原则的计算出舒适度指数，并以 Exel 文件格式存储在指定位置的计算机硬盘上，方便为以后的数据处理和察看，以及为今后在分析和改善铁路轨道质量方面提供依据。

### 5.1.2 数据处理

振动信号经过滤波系统、数据采集系统以及舒适度计算程序后保存到计算机的硬盘上，但是由于考虑到 UIC513 标准中对数据采集速率的要求，此时程序计算出的舒适度值为瞬时舒适度值，还要按照标准规定的置信概率要求对数据进行处理得出该区段内的综合舒适度评估值。

铁路车辆的振动不是稳态的而是波动的，而且车辆的振动量级比较低，振动频率主要在 3Hz 以下，所以选择 5 秒钟时间间隔内的加速度计权均方根值作为加速度的有效值，进而表征舒适度。本设计采用的是简单方法，其设计结构如图 5-2。

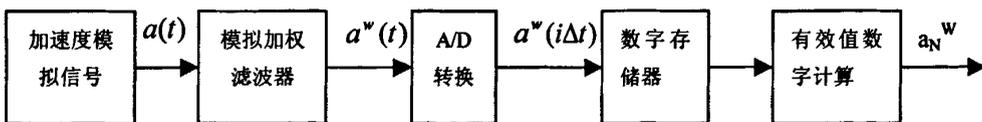


图 5-2 模拟—数字混合方法  
Fig5-2 Analog-Digital Mixed Method

其中：

$$a_N^w = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=(l-1) \times N + 1}^{i=l \times N} [a^w(i\Delta t)]^2} \quad (5-1)$$

$$i=1,2,3,\dots$$

$$l=1,2,\dots,N$$

因为振动的起伏性,旅客所感受到的振动舒适度是由加速度有效值的极值所决定的。另外我们所说的振动舒适度是针对特定列车运行的特定路段所得到,因此必须选择试验路段,根据 UIC513 标准中的要求按照列车行驶 5 分钟的时间作为一个试验路段,那么在 5 分钟的试验路段内可以得到 60 个加速度计权均方根有效值。然后我们需要对这些有效值进行统计,引入了置信度的概念。在求极值的过程中取 60 个样本中置信度在 95% 时的有效值,这样处理的目的是为了防止将太大的加速度值(由于偶然因素导致的)作为极值来计算而不能反映真实的舒适度水平。

数据处理程序的流程图如图 5-3 所示,处理程序:

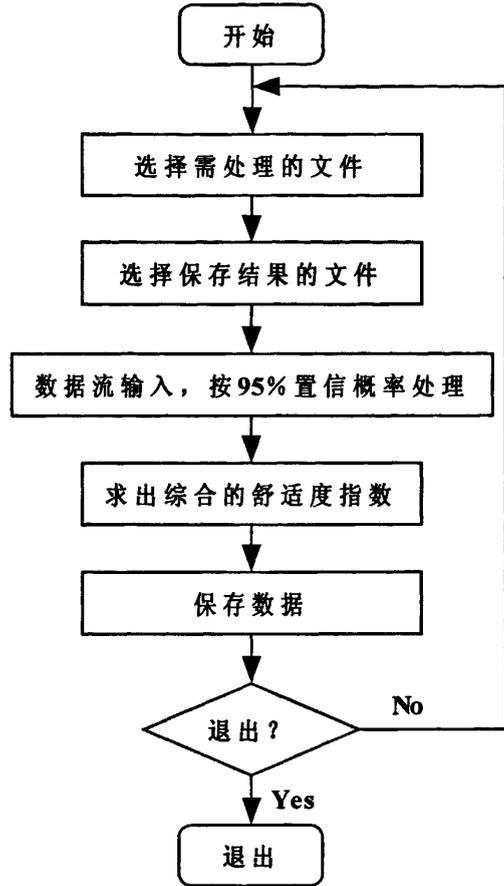


图 5-3 数据处理软件流程图

Fig5-3 Software Flow Diagram of the Data Processing

For J = 0 To 58

For k = (J + 1) To 59

If  $a_N^W(J) < a_N^W(k)$  Then  $X = a_N^W(J)$ :  $Y = a_N^W(k)$ :  $a_N^W(J) = Y$ :  $a_N^W(k) = X$

Next

Next

Write #2,  $a_N^W(56)$

## § 5.2 测试仪的软件设计

### 5.2.1 超低频波形发生器的设计

#### 目的

按照《铁路车辆内旅客振动舒适性评价准则》国际标准所开发的 SSD-J-2 振动舒适度测量仪是基于 MSP430F149 为核心的三维振动便携式分析仪,内含上下、左右、前后振动的生理滤波器,为了调整和标定这组生理滤波器的精度,利用该单片机的一个 PWM 输出端配上  $\Pi$  型 RC 滤波,在软件的支持下构成方便调

节的超低频波形发生器来校验该滤波系统的效果。

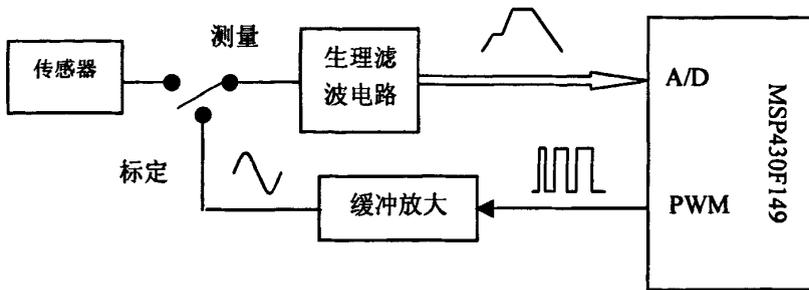


图 5-4 生理滤波自校验系统结构图

Fig5-4 The Block Diagram of the Physiology Filter Self-test System

### 电路设计原理

应用 MSP430F149 进行设计，电路十分简单，产生的波形精度取决于脉宽计数器的精度，最高可达 16 位，频率取决于软件所设计正弦表的大小、系统频率以及读取正弦表的时间长短。应该注意的是所设计的频率应该比需要的频率略高一些，这样由脉宽调制信号到正弦波信号的滤波电路阶数可以降低，其电路结构如图 5-5。

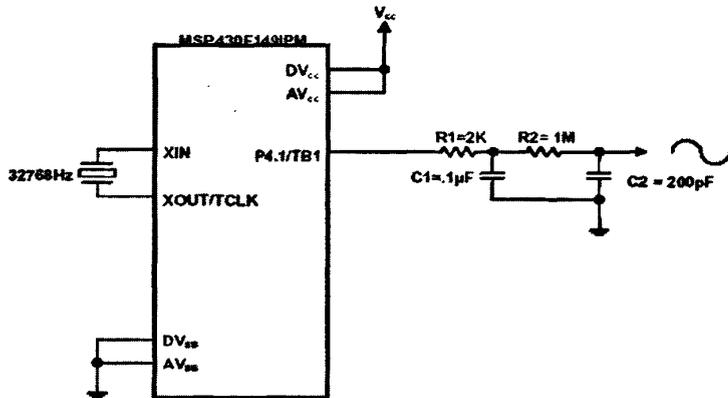


图 5-5 波形发生器电路原理图

Fig5-5 Circuit Diagram of the Wave Generator

### 软件设计

在该超低频波形发生器的软件设计中，主要应用到了以下几个功能模块：即 Timer\_B 定时器、Timer\_A 定时器、CPU 寄存器、片内的数字控制晶振以及 XT1 低功耗振荡器，其主程序流程图如图 5-6：

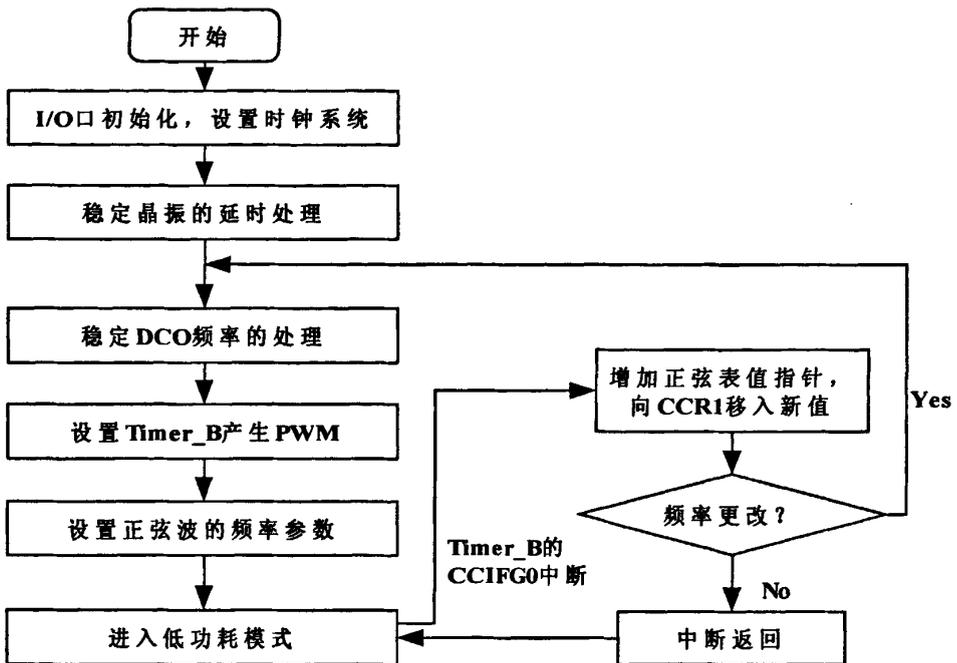


图 5-6 波形发生器软件流程图

Fig5-6 Software Flow Diagram of the Wave Generator

### 1. 稳定 DCO 频率模块

DCO 本质上是一个 RC 振荡器, 所以具有 RC 振荡器的特点, 在应用它作为系统时钟时存在着频率的设置和转换上的不准确, 但由于它是数字控制的振荡器, 可以通过一个已知的频率稳定的晶振如 32768Hz 手表晶振来进行校准, 由于 MSP430F149 不含有锁频环数字逻辑, 所以只有通过软件进行“软锁频”校准 DCO 使 DCO 达到准确的频率, 这十分重要。

程序如下:

```

Setup_TA  mov  #TASSEL1+TACLRL,&TACTL  ;设置 TA 时钟 SMCLK
Setup_CC2 mov  #CCIS0+CM0+CAP,&CCTL2  ;设置 CCR2, 输入信号:
                                           ;ACLK, 捕获模式
           bis  #MC1,&TACTL             ;设置 Timer_A: 连续模式

Test_DCO  bit  #CCIFG,&CCTL2           ;检测捕获标志位
           jz   Test_DCO
           bic  #CCIFG,&CCTL2           ;清除标志位
  
```

```

AdjDCO    mov     &CCR2,R14           ;R14=捕获的 SMCLK 值
          sub     R15,R14             ;R14=捕获 SMCLK 的差值
          mov     &CCR2,R15         ;R15=上次捕获的 SMCLK 值
          cmp     #Delta,R14        ;Delta=SMCLK/ACLK
          jlo    IncDCO
          jeq    DoneFLL
DecDCO    dec.b  &DCOCTL             ;调整 DCO
          jmp    Test_DCO
IncDCO    inc.b  &DCOCTL
          jmp    Test_DCO
DoneFLL   clr    &CCTL2             ;停止 CCR2
          clr    &TACTL             ;停止 Timer_A

```

## 2. 产生 PWM 的 Timer\_B 中断程序

改变正弦波的频率需要改变脉宽信号输出的频率，有不同的方法可以达到这个要求，可以改变精度，进一步改变正弦表的大小；增大或减小延长输出一个正弦波的周期时间；还可以改变主频，来延长指令的执行时间，进而延长周期时间；另外可以利用中断处理延时读取正弦表的方法来控制输出的频率。几种方法均十分简便，只需改变几个参数即可，这里采用的是最后一种方法。

程序如下：

```

TB_ISR    inc     R11                 ;R11, R12 用于改变产生正弦波的
          cmp     R11,R12            ;频率, 延迟读取正弦表
          jne    RT
          incd   R15                 ;增加指针 R15, 指向正弦表的下一
          ;个正弦值
          and    #Number,R15        ;Number=正弦表大小*2
          mov    Sine_Tab(R15),&TBCCR1 ;Sine_Tab 为正弦表指针,
          ;TBCCR1 移入新值
RT        reti

```

通过程序输出波形如图 5-7 所示：

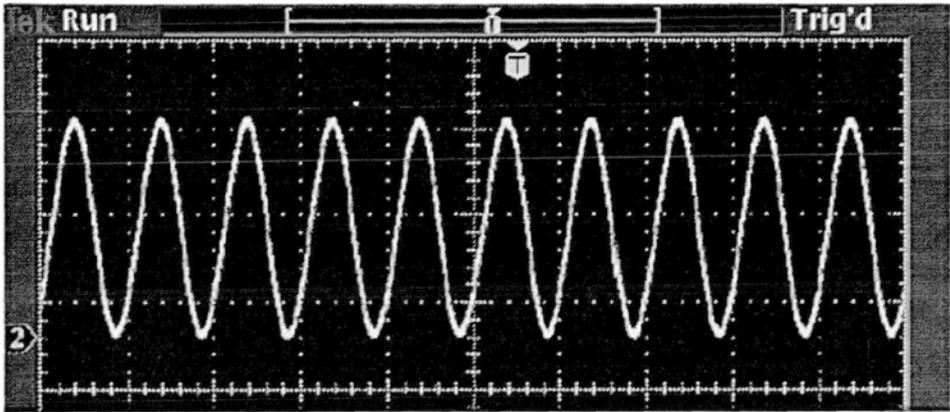


图 5-7 输出波形信号  
Fig5-7 Output Wave Signals

### 5.2.2 界面及键盘响应

考虑到目前用户对电子产品要求的不断提高,我们根据便携式电子产品的使用方便、交互式的人机对话和轻便的设计原则,设计了三个按键和菜单式对话来完成用户的操作要求。由于字符型液晶显示器已发展的相当成熟,所以采用该类型显示器,它的界面主要为英文界面,综合考虑便携式测试仪的功能要求,为其主要设计了四项功能:参数设定 (SET)、测试 (MS)、文件查看 (FILE) 和数据通讯 (COM)。其中部分功能为开放式的,供操作者使用,而部分功能需专业人员进行调试。而操作人员可以通过左移键、进入键和返回键对功能进行设定,光标会随着左移键的变化进行移动,当移动至功能项时呈闪烁状态,等待进入功能状态,操作上十分简单方便,实际设计的便携式仪器界面请参见图 5-8,图中的界面为开机后的欢迎界面,由于篇幅限制,这里给出程序流程图 5-9。



图 5-8 显示界面  
Fig5-8 Display Interface

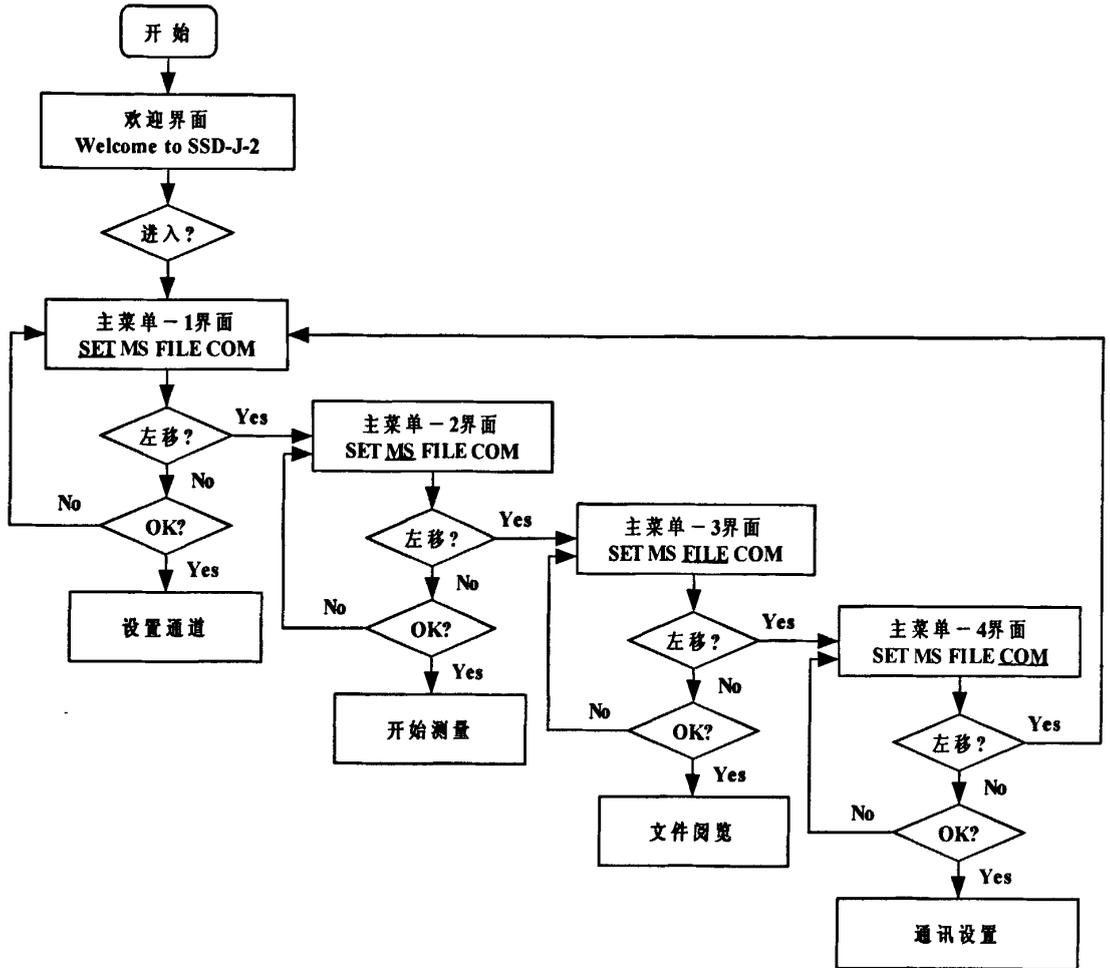


图 5-9 键盘—LCD 显示系统软件流程图

Fig5-9 Software Flow Diagram of the Keys-LCD Display System

### 5.2.3 A/D 转换程序

本程序是多通道循环采集的 A/D 转换程序。它从通道 A0~A5 中读取数据并将它存储在寄存器 R4~R9 中。在通道里，模拟量先与参考电压进行比较，进行模数转换，然后循环此采集储存，可以在“jmp Mainloop”处设置并执行中断，其数据采集模式参见图 5-10。

SetupADC12:

```

mov    #SHP+ADC12SSEL_2+CONSEQ_1,&ADC12CTL1
        ; 采用采样定时器，ADC 时钟为 MLCK，采用序列通道转换
mov.b  #00h,&ADC12MCTL0 ; 通道 A0,Vref+ =AVcc, Vref- =AVss
mov.b  #01h,&ADC12MCTL1 ; 通道 A1,Vref+ =AVcc, Vref- =AVss
  
```

```

mov.b #02h,&ADC12MCTL2 ; 通道 A2, Vref+ =AVcc, Vref- =AVss
.....
bis.b #03h,&P6SEL ; 设置 Port6.0, 6.1, 6.2 为 ADC 功能
mov #REFON+ADC12ON+MSH+ENC,&ADC12CTL0 ; 采样时间 x1,
bis #ENC,&ADC12CTL0 ; 将 ENC 置位
Mainloop
bis #ADC12SC,&ADC12CTL0 ; 开始 A/D 转换
testEOC
bit #BIT0+BIT1+BIT2+BIT3+BIT4+BIT5+BIT6+BIT7,&ADC12IFG
; 判断转换是否完毕 (ADC12IFG=1?)

jz testEOC
mov &ADC12MEM0,R4 ; 转换结果存入 R4,
mov &ADC12MEM1,R5 ; 转换结果存入 R5,
mov &ADC12MEM2,R6 ; 转换结果存入 R6,
..... ; 并自动将标志位
jmp Mainloop
    
```

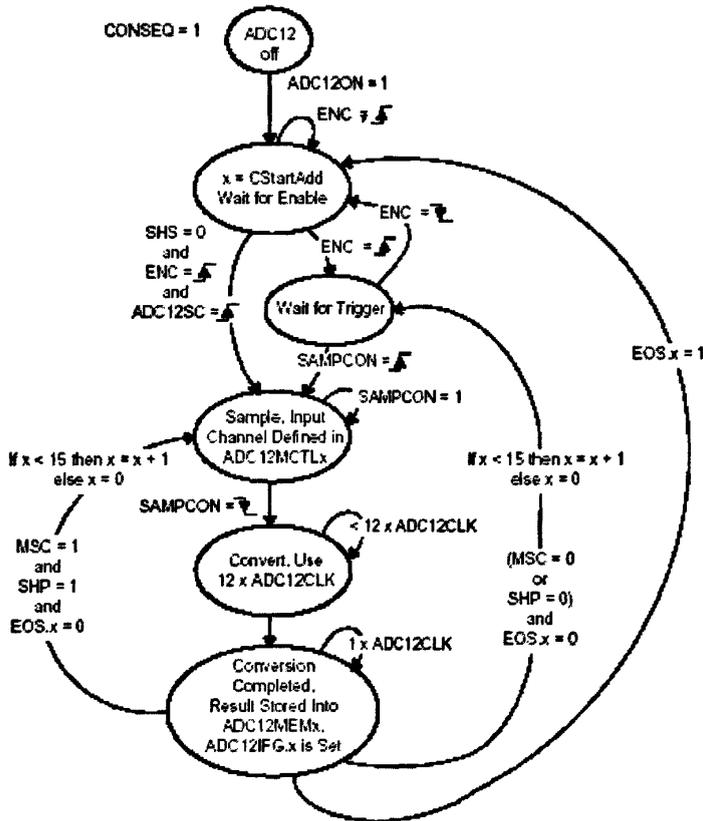


图 5-10 多通道序列采集程序模式图  
Fig5-10 Repeat-Sequence-of-Channels Mode

#### 5.2.4 舒适度评估及显示

经过 A/D 转换程序后采集到的信号储存在寄存器中，下一步就是对其进行运算，求出舒适度评估值。MSP430 提供了一个功能很强的 FFP 浮点库，其包含很多运算功能，需要对其调用实现我们的要求。首先我们需要把浮点库加入到我们的程序中，然后调用其中的加法、乘法、平方以及开方功能求出舒适度值，具体公式参见前面的章节。需要注意的是在调用浮点库的时候，它需要占用内部寄存器，这是在调用程序之前要对已经占用的寄存器内容进行保护，在计算完成之后再恢复原值。

计算出舒适度值之后，我们需要通过 LCD 把结果显示出来，这时我们仍要通过调用浮点库来实现。由于计算得出的舒适度值是以二进制的数值储存在寄存器中，首先将其变为浮点形式的数值，再将浮点形式的数值转换为 BCD 码，最后通过与 LCD 字符库的对比显示出来，流程框图见图 5-11。

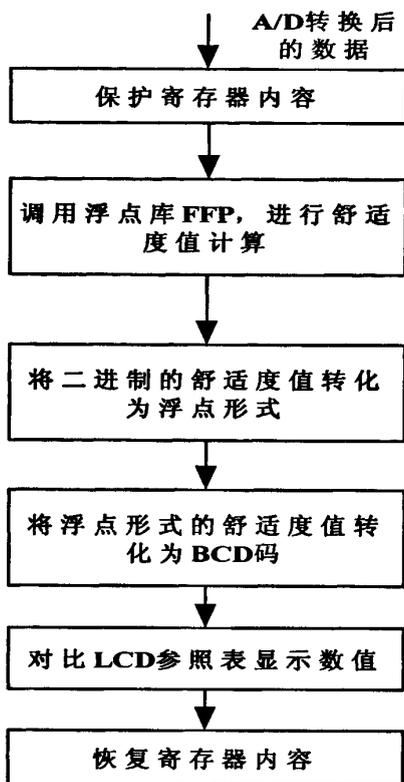


图 5-11 舒适度评估显示系统软件流程图  
Fig5-11 Software Flow Diagram of the  
Comfort Evaluating Display System

## 第六章 测试试验、分析及讨论

按国际铁路联盟 UIC513 技术标准  
《铁路车辆内旅客振动舒适性评价准则》  
在上海—南京，上海（安亭）—昆山路段的振动舒适性实测试验

### 试验对象

根据 UIC513 国际标准的要求，利用上海交通大学和上海铁路局联合开发的旅客列车振动舒适性测量系统，对运行于上海至南京路段的“新曙光号”高速列车、上海至昆山以及安亭至昆山的旅客列车“5064”和“T137”进行振动测量，对试验的结果进行计算分析，得出各试验区段的平均舒适度指数，对各次试验结果进行对比分析以确定测试系统的性能。

### 评估方法

采用模拟数字混合的简单方法

### 试验条件

#### 3. 1 车辆说明

(略)

#### 3. 2 使用者的说明

(略)

#### 3. 3 线路说明

利用全球定位系统(GPS)实时监测列车的方位和时速。  
各区段的方位由 GPS 实测的经、纬度确定。

...

#### 3. 4 运行速度

试验时的运行速度参见测试图所示。

### 测量配套仪器

#### 4. 1 加速度计

型式：集成式电容加速度传感器

量程：±2g

增益：400mV/g

带宽：0---200Hz

#### 4. 2 模数转换器

型号：TLC542

转换类型：渐次逼近型

分辨率：8 位

输入通道：11

输入范围：0—3.4V

转换时间：10  $\mu$ s

精度：1LSB Max

#### 4.3 GPS

型号：GPS12XLC

电源电压：+5—40VDC

定位：15米（49英尺）RMS

速度：0.4节 RMS（匀速状态）

信号刷新率：1s

#### 4.4 计算机

便携式计算机，打印电缆线

#### 4.5 测量系统简单框图

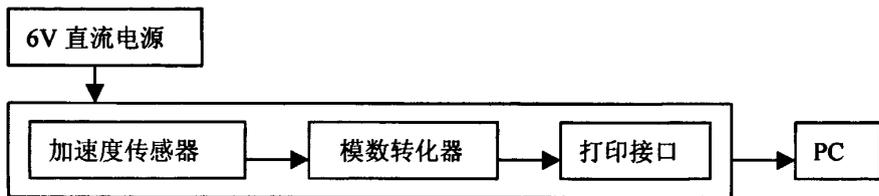


图 6-1 测量系统简单框图

Fig6-1 Simple Frame of the Measurement System

### 5 . 测量试验：

#### 5.1 上海至南京：

5.1.1 本次试验是在运营的高速列车上进行，将上海至南京作为试验区段。根据 UIC513 的规定将试验区段按列车运行 5min 的路程进行分段，共分 25 段，在列车行使时将测量点选在车厢端部。

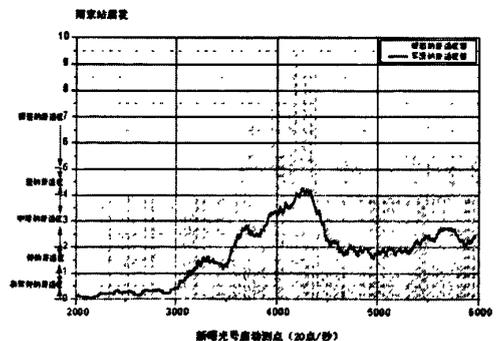
5.1.2 对运行的列车采用 GPS（全球定位系统）进行测速和定位，定位精度达到 15 米以下。

5.1.3 本次试验共有 25 次实测数据，每次测量时间 5 分钟，总数据量为  $4.2 \times 25$  万个。

5.1.4 数据分析与处理：本次试验采用简单方法，通过对 X、Y、Z 三个方向信号的模拟滤波和模数转换后，再进行数据处理，与此同时没有经过滤波的信号也可以经过模数转换器采集到计算机中。

5.1.5 统计计算：根据以上采集到的加速度值按照 UIC513 标准的舒适度计算公式求出的舒适度指数曲线。

5.1.6 数据处理：每 5 分钟的一组时间段可以得出一张该路段的舒适度指数，每组舒适度指数由  $(60 \text{ 个/秒} \times 60 \times 5) = 1.8$  万个数据求得，见组图 6-2：



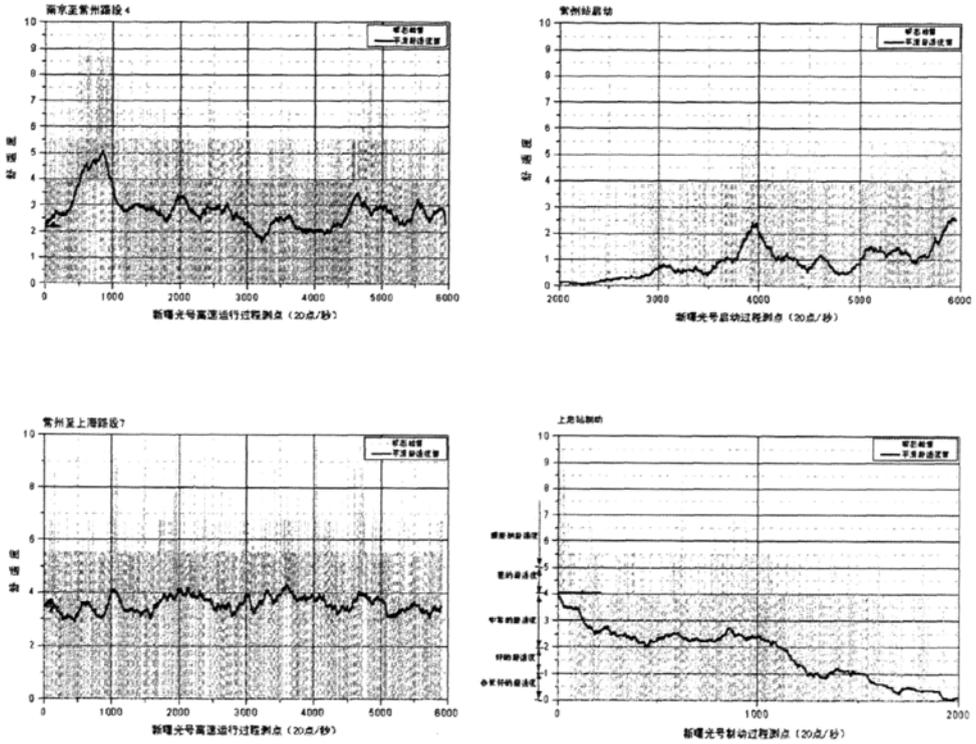


图 6-2 列车启动—制动和运行过程瞬态舒适度曲线  
Fig6-2 Transient Comfort Curve of train during Start-Run-Stop

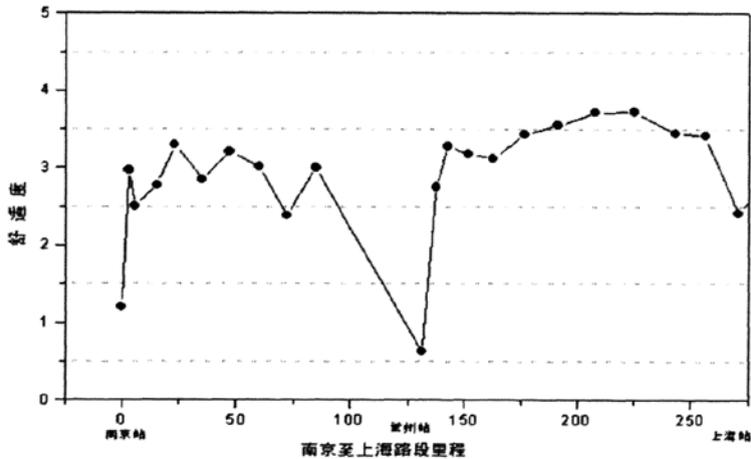


图 6-3 南京至上海舒适度分布曲线  
Fig6-3 The Location Curve of Comfort between Shanghai and Nanjing

5. 1. 7 结果分析：本次试验利用 GPS 测得运行中列车的经度和纬度，绘制出列车运行轨迹，通过列车往返各测一次，两次所绘制的路线基本重合，证明 GPS 定位准确，同时利用 GPS 测得的最高时速为

152Km/h, 平均时速为 96Km/h (上海至南京方向)。从图 6-3 中可以看出在南京站到常州站和常州站到上海站的中间路段, 即高速行驶的过程中舒适度指数比较大, 最大的达到 3.7, 而此时的车速达到 150Km/h, 而对于接近车站的试验区段由于列车时速较小, 舒适度指数较小, 舒适性优于其他区段。可见列车行驶速度对舒适性有一定的影响。

根据UIC513舒适性的评价尺度, 大部分区段都处于中等的舒适性(2.5—3.5之间)。

### 5. 1. 8 测试过程



图 6-4 舒适度测试系统  
Fig6-4 Measurement System of Comfort

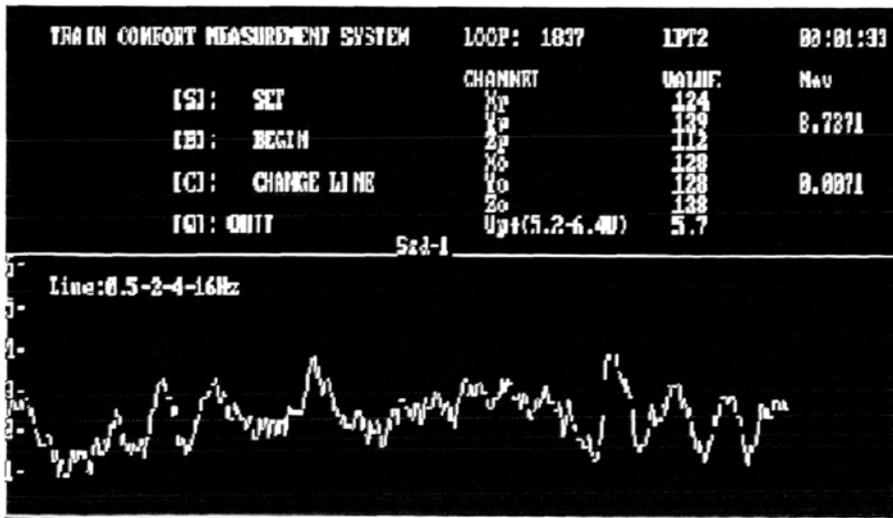


图 6-5 瞬态舒适度实时显示  
Fig6-5 Real Time Display of the Transient Comfort

5. 2 上海至昆山:

5. 2. 1 试验说明: 在上海至昆山的路段进行了多次实际测量, 试验的装置条件与上面所叙述的相同, 具体的试验分析结果参见图 6-6、图 6-7。

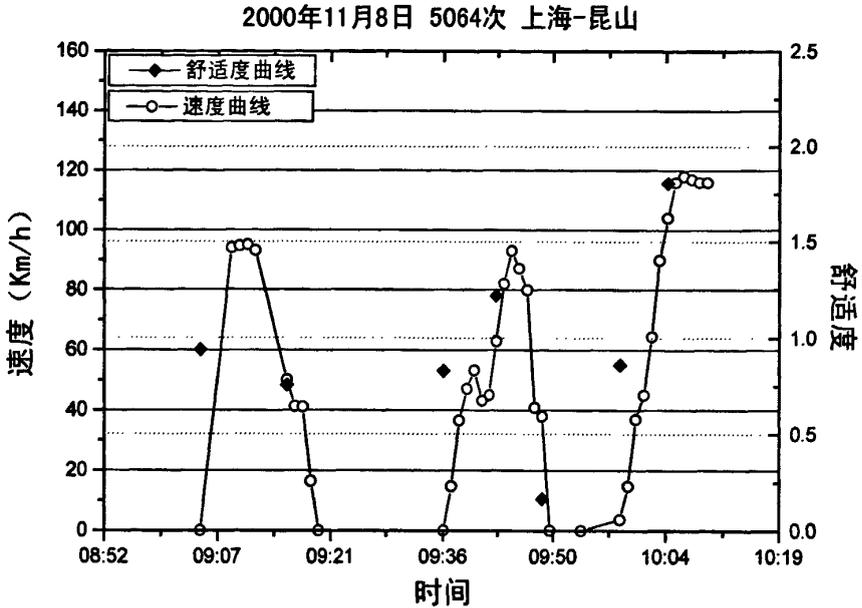


图 6-6 上海至昆山舒适度-速度分布曲线

Fig6-6 The Location Curve of Comfort-Speed between Shanghai and Kunshan

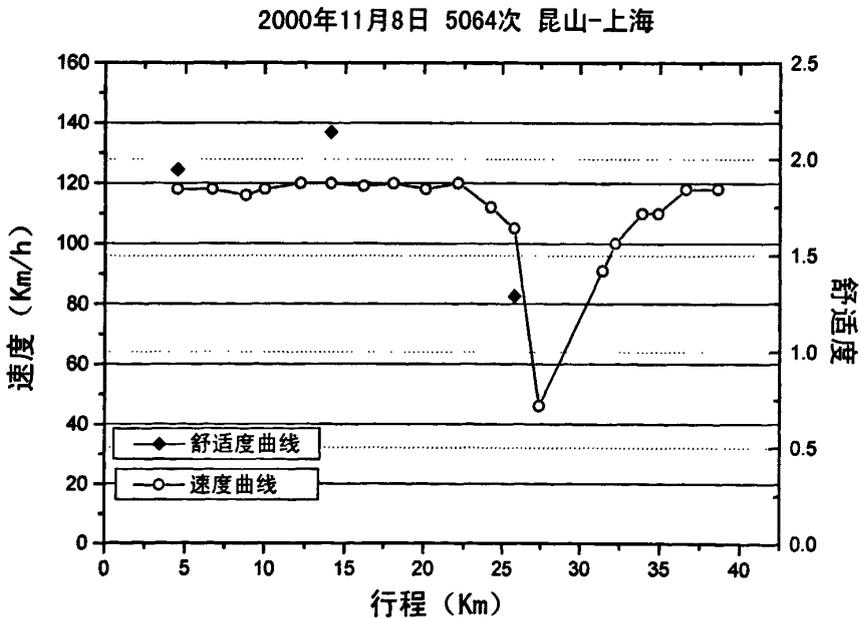


图 6-7 昆山至上海舒适度-速度分布曲线

Fig6-7 The Location Curve of Comfort-Speed between Shanghai and Kunshan

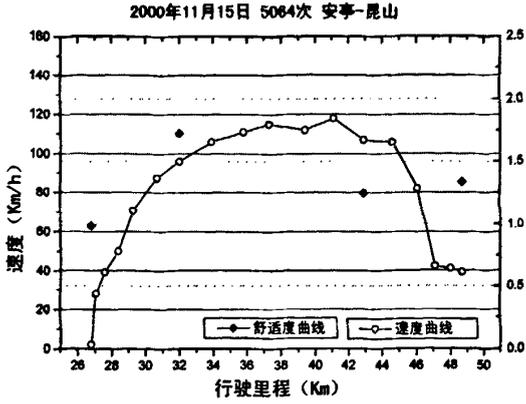


图 6-8 安亭至昆山舒适度—速度分布曲线-1  
Fig6-8 The Location Curve of Comfort-Speed between Anting and Kunshan-1

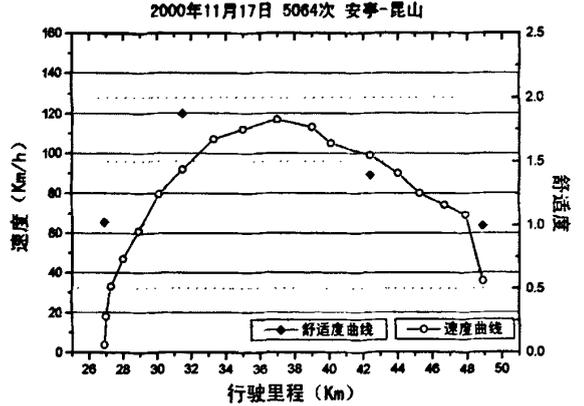


图 6-9 安亭至昆山舒适度—速度分布曲线-2  
Fig6-9 The Location Curve of Comfort-Speed between Anting and Kunshan-2

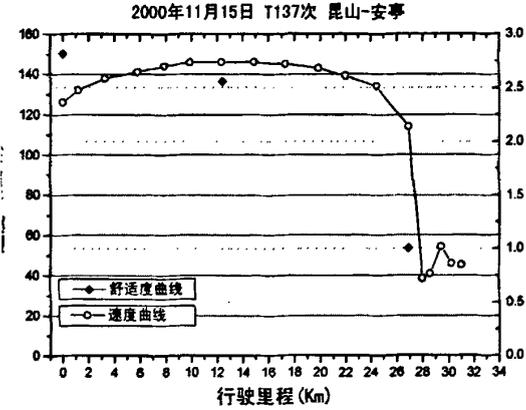


图 6-10 昆山至安亭舒适度—速度分布曲线-3  
Fig6-10 The Location Curve of Comfort-Speed between Anting and Kunshan-3

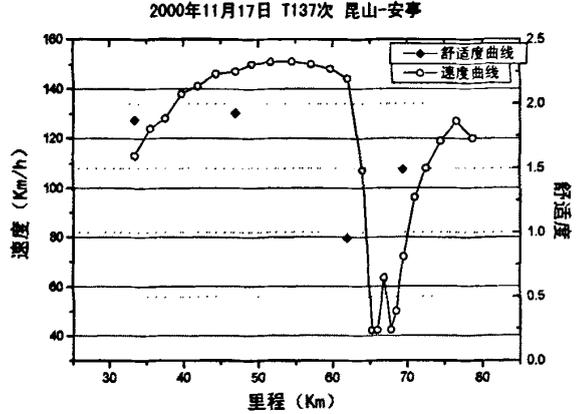


图 6-11 昆山至安亭舒适度—速度分布曲线-4  
Fig6-11 The Location Curve of Comfort-Speed between Anting and Kunshan-4

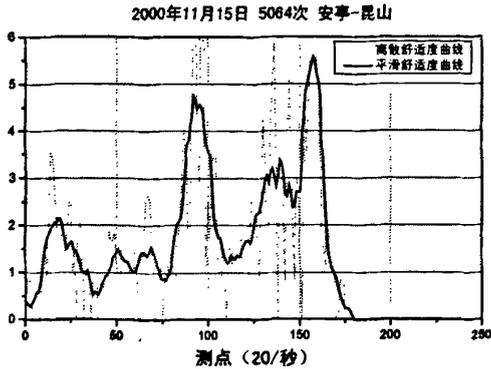


图 6-12 安亭至昆山列车制动时舒适度曲线-1  
Fig6-12 The Curve of Comfort during Stop between Anting and Kunshan-1

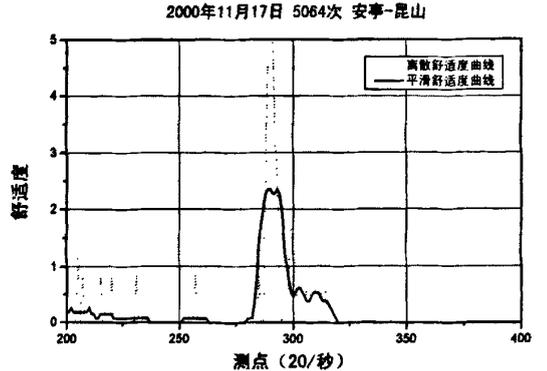


图 6-13 安亭至昆山列车制动时舒适度曲线-2  
Fig6-13 The Curve of Comfort during Stop between Anting and Kunshan-2

5. 2. 2 结果分析：从这组图中我们可以看出舒适度与速度的相关性，舒适度随着速度变化的增加而变差；从图 6-12 和图 6-13 中我们可以清楚的看出列车在制动时舒适度的变化情形，在制动时舒适度变差，与我们的日常感觉是十分吻合的。而且还可以看出：实验系统经过多次测量后，结果的重复性比较好，证明了开发的测试系统的稳定和可靠性能，这一点我们从图 6-14 和图 6-15 的又一次在上海至南京路段的结果中也可以看出。并且通过分析实验结果，对实验机车在不同路段行驶的速度可以提供参考依据，对行驶区间的轨道情况可以提出参考意见，对改进铁路系统状况具有十分重要的价值。

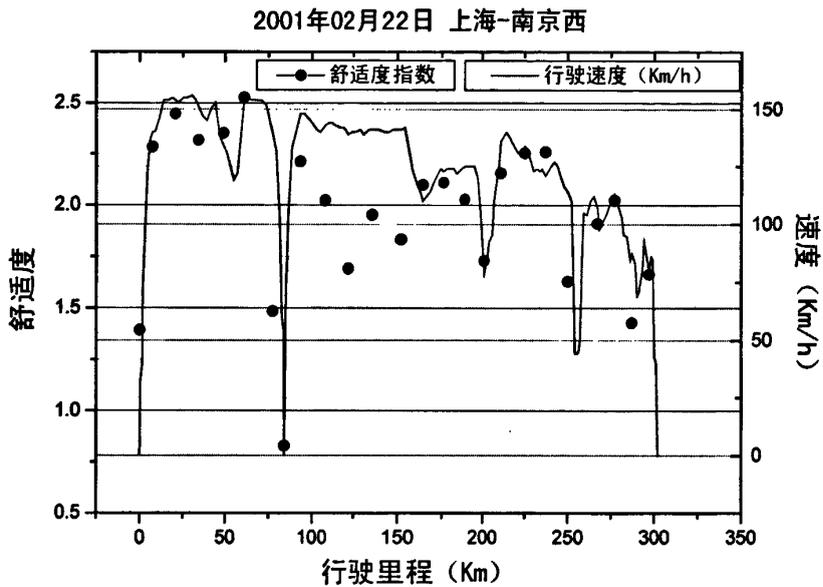


图 6-14 上海至南京舒适度—速度分布曲线-1

Fig6-14 The Location Curve of Comfort-Speed between Shanghai and Nanjing-1

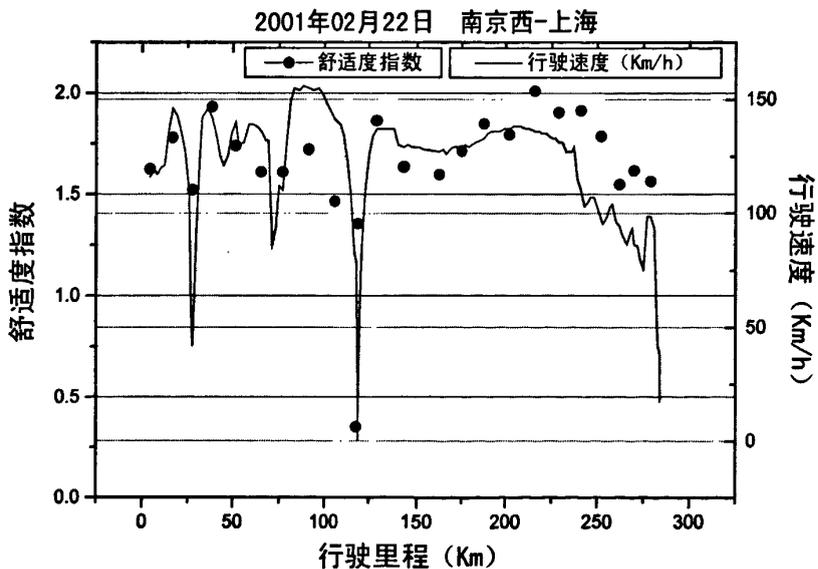


图 6-15 上海至南京舒适度—速度分布曲线-2

Fig6-15 The Location Curve of Comfort-Speed between Shanghai and Nanjing-2

按国际铁路联盟 UIC513 技术标准  
《铁路车辆内旅客振动舒适性评价准则》  
在上海——厦门之间路段的振动舒适性实测试验

### 1. 试验对象

根据 UIC513 国际标准的要求, 利用上海交通大学和上海铁路局联合开发的旅客列车振动舒适性测量系统, 在试验机车上对上海至厦门之间的部分路段进行了振动测量、分析和评估, 最终得到各试验区段的平均舒适度指数。

### 2. 评估方法

采用在车厢地板设置测点的模拟数字混合简单方法

### 3. 试验条件

#### 3.1 车辆说明

(略)

#### 3.2 使用者的说明

(略)

#### 3.3 线路说明

利用利用全球定位系统 (GPS) 实时监测列车的方位和时速。  
各区段的方位由 GPS 实测的经、纬度确定, 参见图 6-16 示。

#### 3.4 运行速度

最大运行速度: 117Km/h

平均运行速度: 70~80Km/h

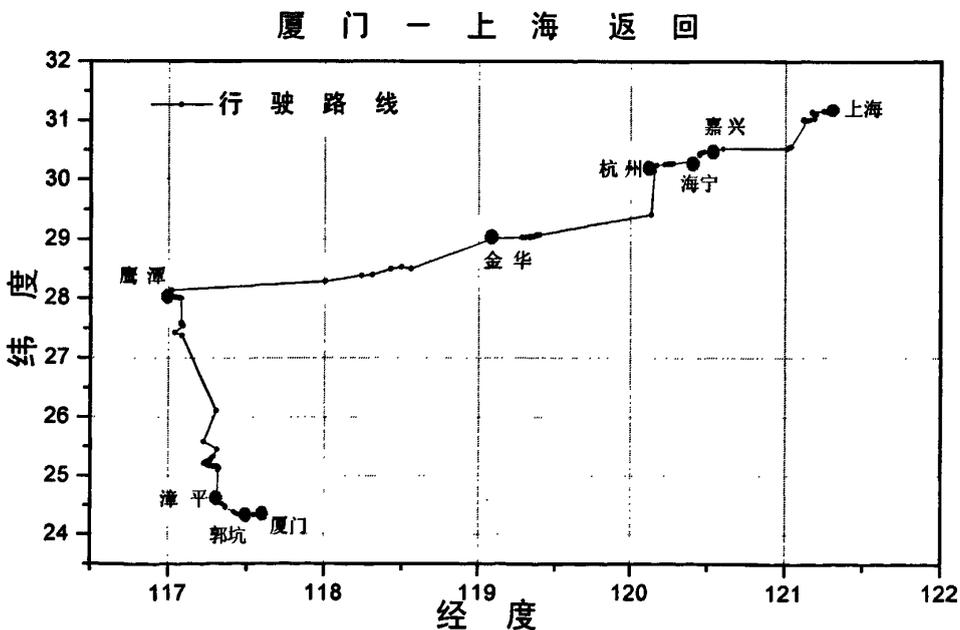


图 6-16 利用全球卫星定位系统 (GPS) 实时监测列车的行驶路线

Fig6-16 The Route of the Train Traced with GPS

#### 4. 测量配套仪器

##### 4.1 加速度计

型式：集成式电容加速度传感器

量程：±2g      增益：400mV/g      带宽：0---200Hz

##### 4.2 模数转换器

型号：TLC542

转换类型：渐次逼近型      分辨率：8位      输入通道：11

输入范围：0—3.4V      转换时间：10 μs      精度：1LSB Max

##### 4.3 GPS

型号：GPS12XLC

电源电压：+5—40VDC      定位：15米（49英尺）RMS

速度：0.4节 RMS（匀速状态）      信号刷新率：1s

##### 4.4 计算机

便携式 PC 机，打印电缆线

##### 4.5 测量系统简单框图

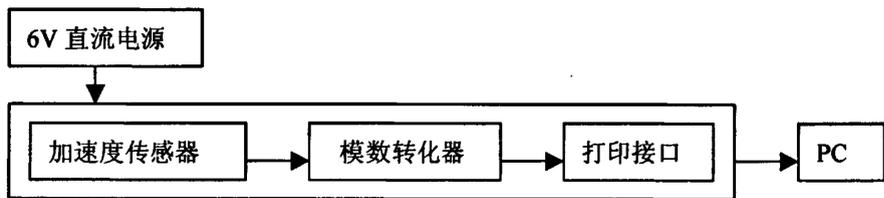


图 6-17 测量系统简单框图

Fig6-17 Simple Frame of the Measure System

#### 5. 测量试验说明:

本次试验在运行的实验车厢上进行，将上海至厦门之间作为试验区段。根据 UIC513 的规定将试验区段按列车运行 5min 的路程进行分段，测量点选在车厢端部。

- 对运行的列车采用 GPS(全球定位系统)进行测速和定位,定位精度达到 15 米以下
- 本次试验共有 73 次实测数据,每次测量时间 5 分钟,总数据量为  $4.2 \times 73$  万个。

#### 6. 数据分析与处理

本次试验采用的是简单方法，通过对 X、Y、Z 三个方向信号的模拟滤波和模数转换后，再进行数据处理，与此同时没有经过滤波的信号也可以经过模数转换器采集到计算机中。

### 6.1 统计计算

根据以上采集到的加速度值按照 UIC513 标准的舒适度计算公式求出舒适度值。

### 6.2 数据处理

每 5 分钟的一组时间段可以得出一张该路段的舒适度指数，每组舒适度指数由 (60 个/秒×60×5) =1.8 万个数据求得。

### 6.3 回归分析

通过求出舒适度与速度的回归曲线，可以为进一步的判定舒适度随速度的变化提供预测。

## 7. 测试结果

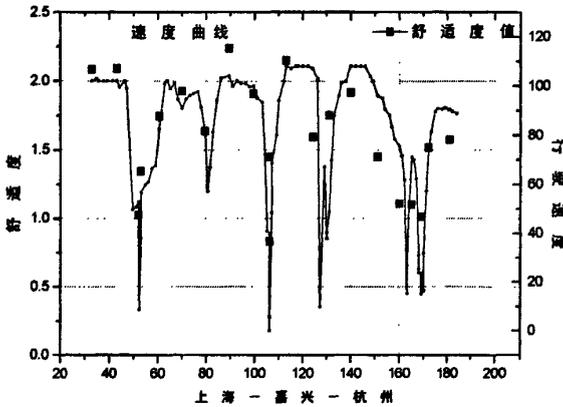


图 6-18 舒适度—速度分布曲线-1

Fig6-18 The Location Curve of Comfort-Speed-1

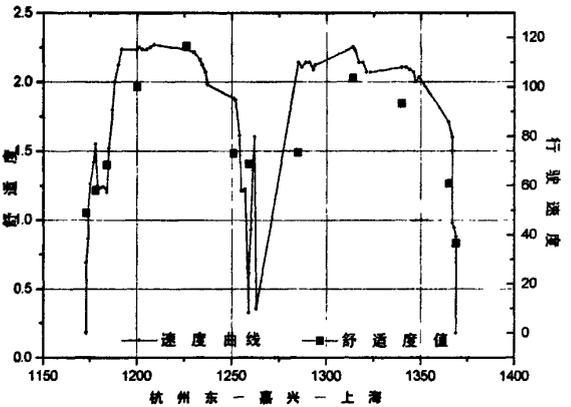


图 6-19 舒适度—速度分布曲线-2

Fig6-19 The Location Curve of Comfort-Speed-2

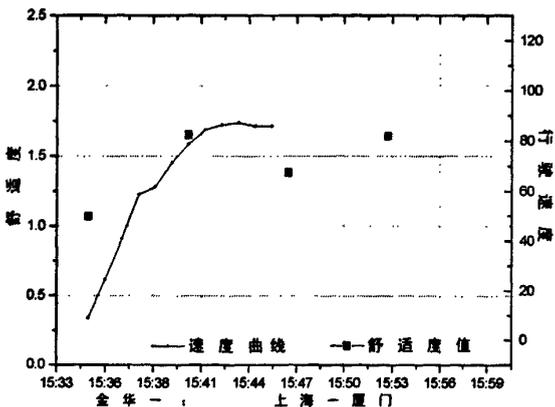


图 6-20 舒适度—速度分布曲线-3

Fig6-20 The Location Curve of Comfort-Speed-3

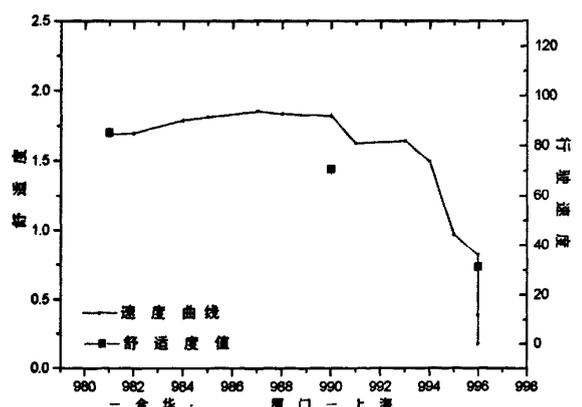


图 6-21 舒适度—速度分布曲线-4

Fig6-21 The Location Curve of Comfort-Speed-4

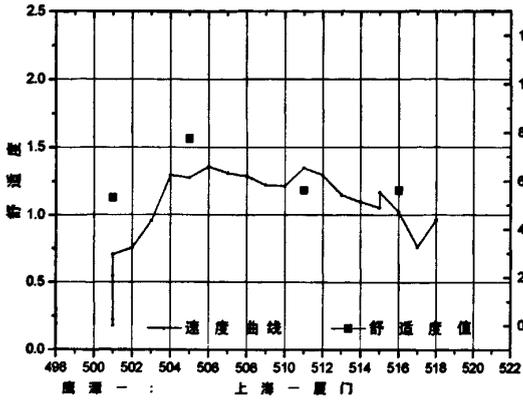


图 6-22 舒适度-速度分布曲线-5

Fig6-22 The Location Curve of Comfort-Speed-5

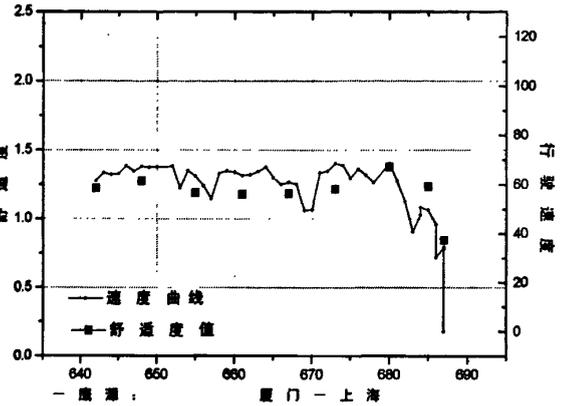


图 6-23 舒适度-速度分布曲线-6

Fig6-23 The Location Curve of Comfort-Speed-6

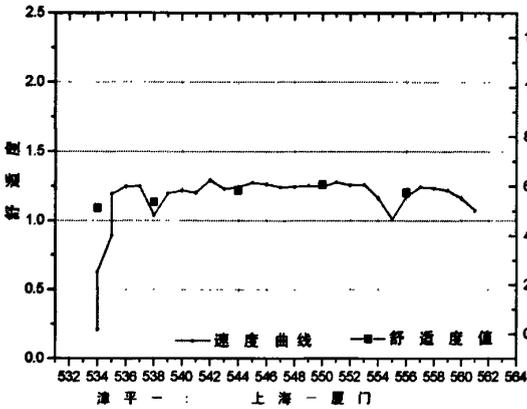


图 6-24 舒适度-速度分布曲线-7

Fig6-24 The Location Curve of Comfort-Speed-7

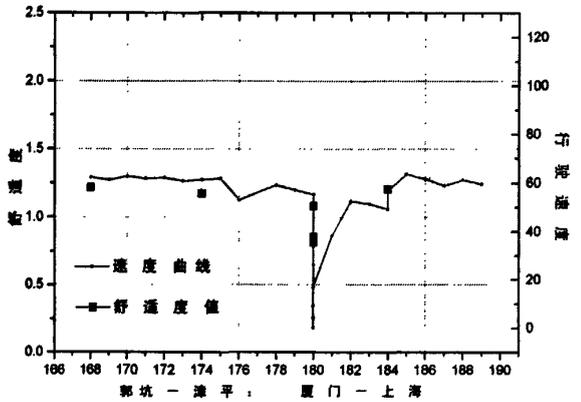


图 6-25 舒适度-速度分布曲线-8

Fig6-25 The Location Curve of Comfort-Speed-8

8. 结果分析:

8.1 本次试验利用GPS测得运行中列车的经度和纬度，绘制出列车运行轨迹，通过列车往返各测一次，两次所绘制的路线基本重合，证明GPS定位准确，同时利用GPS测得的最高时速为117Km/h，平均时速为70~80Km/h公里左右。

8.2 从组图中可以看出:

| 行驶路段  | 行驶速度 (Km/h) | 舒适度值     |
|-------|-------------|----------|
| 上海-杭州 | 100~110     | 2.0左右    |
|       | 60~70       | 1.5左右    |
|       | 40以下        | 1.2以下    |
| 金华-鹰潭 | 80~90       | 1.5~1.7  |
| 鹰潭-漳平 | 50~70       | 1.2~1.3  |
| 漳平-郭坑 | 55~65       | 1.1~1.25 |

由上可见在列车行驶时速较小时，舒适度指数较小，舒适性优于列车行驶时速较大的区段，所以列车行驶速度对舒适性有一定的影响。

由于列车行驶的速度较慢，根据 UIC513 舒适性的评价尺度，大部分区段都处于好的舒适度程度。而且由于东西方人群的不同，对振动的生理反应也有所不同，所以标准中的评估等级需要进一步的探讨，从而制定出适合我国人群的等级评估体制。

### 8.3 应用舒适度与速度的相关性对提速后舒适度的预报

对 SSD-J-1 仪及 GPS(卫星定位仪) 测量结果进行统计, 获图 6-26 和图 6-27 ; 表明在同一路段同一车型状况下, 舒适度与速度呈线性相关, 回归方程可预报进一步提速时舒适度的中间值和最大值, 为提速方案提供定量依据。

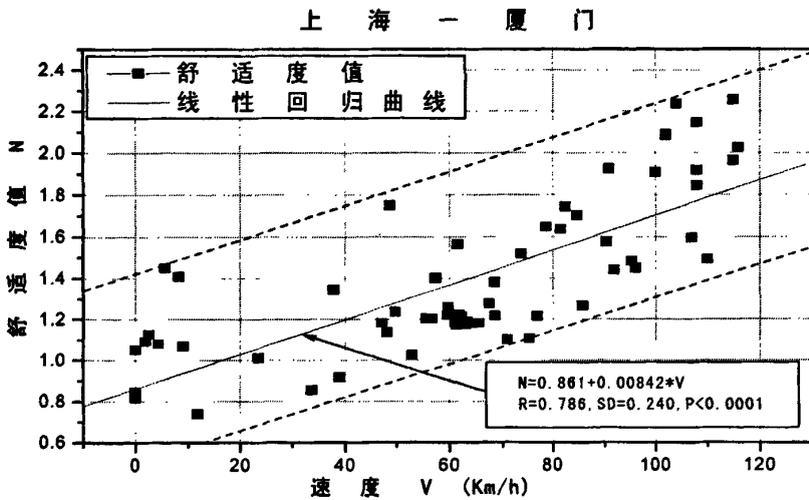


图 6-26 舒适度—速度相关性回归曲线-1  
Fig6-26 Regression Curve of Comfort-Speed-1

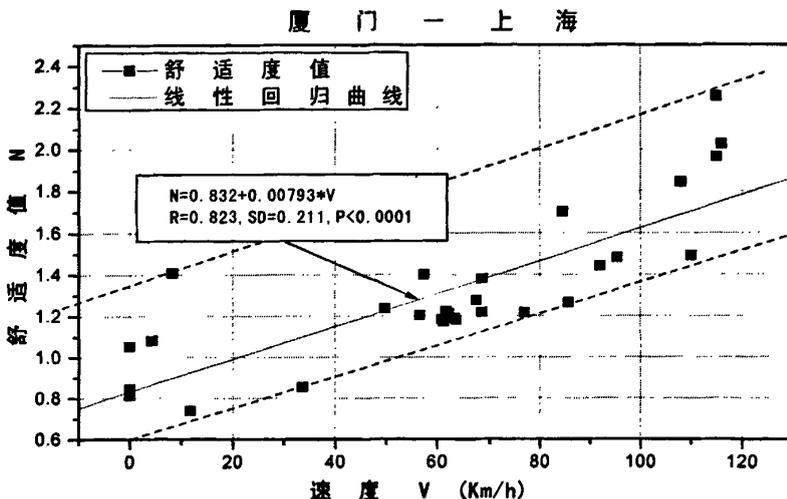


图 6-27 舒适度—速度相关性回归曲线-2  
Fig6-27 Regression Curve of Comfort-Speed-2

## 9. 讨论

在上海铁路局领导的关怀和支持下, UIC513 技术在我国应用的研究项目得以及时启动, 经项目组成员的共同努力已取得突破性进展。然而要使这项技术从几个人手中转移到全国铁路运行行业应用中还有不少的工作要做:

①由于东西方人种上差异, 对振动的生理反应也有所不同。因此生理滤波曲线的制定以及舒适度值的分级也应通过广泛的试验后按中国人的特点而确定, 这方面将需开展更多的工作。

②由研究样机转变为市场化产品还应进行以下的工作: 建立传感器的动态标定和年检手段; 生理滤波器的动态调试和检验条件; 组合传感器的耐用性和固定可靠性改进设计; 硬件系统及测控软件的进一步优化。

因此结合由铁道部审定并通过的我国同类技术标准, 着重地开展下阶段工作将是十分重要的, 它对我国的铁路事业整体的高速发展迎合世界潮流方面具有十分深远的意义。

## 第七章 结 论

本研究的主要研究工作是按照国际铁路联盟 UIC513 准则的要求设计开发旅客列车振动舒适性简单方法的测试系统,并且在此基础上开发我国第一台便携式振动舒适度测量仪。而且通过多次的实际测试实验,证实了测试系统的可靠性和稳定性,实验结果和分析结论得到了上海铁路局以及上海铁路技术监督所的认可。通过整个项目的开发主要获得了以下的成果和结论:

1、该项目是在我国铁路广泛提速,磁悬浮铁路工程已在上海成功启动和高速铁路即将上马的形势下启动的,具有重大的工程应用价值。项目以国际最新的技术标准为研究基础,完全符合我国改革开放的大方向。通过认真研究 UIC513 标准,推出了等同应用该标准作为我国舒适度评价规范,明显加快了我国轨道交通技术与国际标准接轨的步伐。

2、测试系统是一个软硬件紧密结合的复杂系统,在项目开发研究过程中应用了国际先进的传感器技术、电子器件、电路设计技术、计算机技术和卫星定位技术、以及大量的先进软件和操作系统,如 IAR 操作系统、汇编语言、Basic、Matlab、Matcad、Origin、Orcad 和 Protel 等。使用他们进行模拟电路设计仿真、软件编程、数据结果分析、图形动态显示等。通过高科技手段成功地开发出 SSD-J-1 应用测量仪,而且整个系统配备全球卫星定位系统 GPS 用来绘制电子地图,实时跟踪列车状态,为分析结果提供依据。并且在已经成熟的基础上进一步开发以单片机为核心的便携式智能液晶显示测试仪,应用目前国际先进的微处理器和功能元件,实现了我国国内第一台振动舒适度测试仪器的开发,它从某种意义上讲弥补了我国在旅客列车舒适度评估研究方面的不足。

3、由于系统工作在环境比较恶劣的情况下,在硬件设计当中考虑了大量的可靠性和精确性问题,以达到提高系统的信噪比和精度、抗干扰能力的要求。电路中采用了专用电源稳压设计、虚地设计、接口电平转换设计以及驱动设计等。使硬件电路的设计达到标准中的要求。

4、研究组做到理论和实践相结合,在上海铁路局线路范围上海至厦门部分路段进行了多次实测试验,得到了大量的测量数据,完成了多次测试报告,取得了丰富的实际经验和重要的评定结果。SSD-J-1 测量仪可以作为未来推广 UIC513 标准的测量仪设计基础。

5、在开发设计以及结果分析的过程中,运用了大量的科学计算工具和方法,忠实 UIC513 标准中的统计分析思想,运用数字信号处理理论、优化理论等对数据

进行处理，并且通过设计数字滤波器，把它的结果与模拟滤波器的实现效果相比较，不断的改善硬件电路的设计，提高模拟电路的性能。

6、通过研究表明，UIC513 标准可以用于我国的铁路车辆内旅客振动舒适度评估，中国人有能力应用 UIC513 标准。研究成果填补了我国在列车舒适度评价技术上的空白，并形成了具有我国知识产权的技术。

## 参 考 文 献

1. 王悦明、王新锐, 客车舒适度的评定, 铁道机车车辆, 2000, 3(1)
2. 张载鸿, 《微型机(PC系列)接口控制教程》, 清华大学出版社, 1992
3. 曾敏士翻译, 欧洲高速铁路联网高速列车技术条件, 1994
4. 欧洲高速铁路连网高速列车技术条件, 铁道部标准计量局, 1994.5
5. 铁路车辆内旅客振动舒适性评价准则, 铁道部标准计量研究所, 1998.10
6. 铃木 浩明等(日), 列车舒适度的评价, 国外铁道车辆, 1999.2
7. Norio TOMII, Urban Transportation Technology Project, QR of RTRI, 1999.4
8. В. И. В Е Л Я Е В, 列车纵向动力对旅客舒适度的影响, 国外铁道车辆, 1999. 6
9. 余展酋, 高速列车舒适度评价, 铁道机车车辆, 1999.2
10. 曾庆元、郭向荣, 《列车桥梁事变系统振动分析理论与应用》, 中国铁道出版社, 1999
11. 邓德祥、马恕, 《QBasic 程序设计教程》, 清华大学出版社, 1997
12. UIC Code 513, Guidelines for evaluating passenger comfort in relation to vibration in railway vehicles, 1994
13. ISO2631-1, Mechanical vibration and shock evaluation of human exposure to whole body vibration, 1997
14. TB/T 铁路车辆内旅客振动舒适性评价准则, 铁标计[2000]28号, 2000
15. 胡大可, 《MSP430系列超低功耗16位单片机原理与应用》, 北京, 北京航空航天大学出版社, 2000
16. MSP430 13x、14x MIXED SIGNAL MICROCONTROLLER PRODUCT PREVIEW, TI Application Report SLAS272A—JULY 2000
17. MSP43013X/14X 系列单片机在数据采集中的应用
18. Darren Staples and Torsten Brandes, The MSP430x1xx Basic Clock System, TI Application Report SLAA081 - June 2000
19. Anton Muehlhofer, Controlling the DCO Frequency of the MSP430x11x, TI Application Report SLAA074 - June 2000
20. MSP430 Family – Architecture Guide and Module Library, 1996
21. MSP430 Family – Assembly Language Tools User’s Guide, 1994
22. MSP430 Family – Software User’s Guide, 1994
23. MSP430 Family – Metering Application Report, 1997

24. ADXL05 single chip accelerometer with signal condition—Specifications, 美国模拟器件公司, 1995
25. TI 模数/数模转换器数据手册, P&S 武汉力源电子股份有限公司, 1998.4
26. TPS7301、TPS7333、TPS7348、TPS7350 带延迟复位功能的低降落稳压器数据手册及应用笔记, 武汉力源电子股份有限公司
27. X1203/X1243 实时时钟/日历/闹钟应用笔记 AN118/119, 武汉力源电子股份有限公司
28. CAT24WC256 256K 位 I<sup>2</sup>C 串行 E<sup>2</sup>PROM, 广州周立功单片机发展有限公司
29. Mike Mitchell, Using PWM Timer\_B as a DAC, TI Application Report SLAA116 – December
30. 周晓伟, 快速列车舒适性测量系统的研究, 铁路技术监督, 1999, 9 (9)
31. 陈粤初 窦振中等, 《单片机应用系统设计与实践》, 北京航空航天大学出版社, 1992
32. 程振宇, 于华滨等, 便携式振动测量系统的研制, 仪器技术与传感器, 2000.4
33. 魏庆国, 周卫星, 点阵式 LCD MGLS240128T 与单片机的接口与编程, 电子技术应用, 1997.2
34. 郝鸿安, 《常用模拟集成电路应用手册》, 北京, 人民邮电出版社, 1991
35. 徐军毅, 张友德等, 《单片微型计算机原理与应用》, 上海, 上海科学技术出版社, 1988
36. 张友德, 《MCS-51 单片微机使用子程序及其应用》, 上海, 复旦大学计算机科学系, 1988
37. 张令弥, 《振动测试与分析》, 航空工业出版社, 1994.8
38. 何希才等, 《传感器应用及其接口电路》, 科学技术文献出版社, 1996
39. 余瑞芬等, 《传感器原理》(第二版), 航空工业出版社, 1994.8
40. 刘乐善等, 《微型计算机接口技术》, 电子科技大学出版社, 1998
41. 陈清山等, 《最新世界 CMOS 数字集成电路系互换手册》, 中南工业大学出版社, 1991
42. 陈清山等, 《最新世界 TTL 数字集成电路系互换手册》, 中南工业大学出版社, 1991

## 致 谢

测量系统的设计是在倪纯珍、陈立功两位老师的悉心指导下得以完成的。倪纯珍副教授在系统硬件设计方面丰富的经验,在组装调试过程中的细致分析和突破能力,及其在整个课题的开展过程中所展示的凝聚能力给了我最大的启发和帮助,使得我很快地成长起来,学习到了很多宝贵的经验,能够顺利地完成本研究。另外陈老师丰富的专业知识、热忱的教学态度、严谨的治学精神和严密的学术思维使我受益终生,在此向他们表示最诚挚的谢意。

同时还要感谢与本课题组合作的上海铁路技术监督所的陆仁诚高工、王晓云高工、张雪磊高工和张乃超工程师,他们对课题的设计和开发提出了很多宝贵的意见,并且为课题顺利完成多次试验提供了极大的帮助和指导。

还要感谢洪钟瑜教授、陈志强博士后、王辰煜博士后、耿明硕士,他们在课题开发和设计中给予了大力支持与帮助。

最后,感谢所有在设计中帮助和教导过我的老师和同学,衷心地谢谢他们!

## 攻读学位期间发表的学术论文目录

1. 陈海波、倪纯珍、陈立功, 旅客列车振动舒适性简单测量方法的研究, 《振动与冲击》, ISSN 1000-3835, CN31-1316/TN, 已录用, 2002年2月待发表
2. 陈海波、陈立功、倪纯珍, 应用 MSP430F149 单片机的超低频波形发生器, 《电子技术应用》ISSN 0258-7998, CN11-2305/TN, 2001年第12期 P22-23
3. 陈海波、陈立功、倪纯珍等, 用 MSP430 实现 LCD 人机界面系统, 《电子产品世界》, ISSN 1005-5517, CN11-3496/TN, 2001年第11(B)期 P13-15
4. 陈立功、倪纯珍、陈海波等, 按 UIC513 标准评估旅客列车振动舒适度, 《中国铁路》, ISSN 1001-683X, CN11-2702/U, 2001年第4期 P60-62
5. 耿明、陈立功、倪纯珍、陈海波, MSP430F14X 系列单片机中键盘和 LED 显示接口的实现, 仪表技术与传感器, ISSN 1002-1814, CN21-1154/TH 已录用, 2002年2月待发表