

岩溶地区桩基模拟试验自动测试系统研究

摘要：灌注桩在岩溶发育地区的应用比较广泛，是一种常见的施工方法，但国内外对此进行系统的研究工作并不多，对一些参数的确定一般是凭经验而定，缺乏一定的理论依据。岩溶地区灌注桩的应用研究是根据相似理论进行桩基模拟试验，以此对灌注桩的特性进行研究。

为了使得桩基模拟试验的数据采集和成果处理实现自动化，并得到精确的、有用的试验数据，本文首先根据桩基模拟试验所测参数的要求，结合物理模型的设计和制造进行自动测试系统方案设计，并选择合理的测试仪器，组装成一套自动测试系统；然后对此自动测试系统的精度、测试仪器的结构、系统软件的编制等进行了分析和说明，并用 Delphi5.0 语言编制了实用的静态应变数据处理程序；最后把此自动测试系统运用于桩基模拟试验中，证明了是一套切实可行的自动测试系统。

本文组成的自动测试系统使得岩溶地区灌注桩应用研究的数据采集和处理实现了自动化，并能对桩基的现场自动测试系统的研究提供一定的参考价值。

关键词： 桩基模拟试验 自动测试 数据采集 数据处理

The Automated Test System Research Of The Pile Foundation Imitate Experiment in the Karst Region

Abstract: The cast-in-situ piles application for the growth karst region is extensive, and is a familiar construction method, but the domestic and international research about this are not much, it is generally rely on the experience to determine some parameters, lacking the basis of certain theories. The application study on the cast-in-situ piles in the karst region make pile foundation imitate experimenting according to the alike theories, then to research the specific property of the cast-in-situ piles.

To realize the automatic data gathering and data processing in pile foundation imitate experiment, and collect the precision and useful trial data, this paper first according to the request for the test parameters of the pile foundation imitate experiment, and combine with the designing and making of the physics model proceeding the project designing of the automated test system, and chose the reasonable test instrument, assemble an automatic test system; Then to analysis and explain the accuracy, the construction of test instrument and compiling the software etc, about the automated test system, counteracted the Delphi5.0 language to make procedure on the data processing of the static state stress; Finally this automated test system adopt to the pile foundation imitate experiment, proofing it is a viable automated test system.

The assembling automated test system according to this paper, realize the automation on the data gathering and data processing in the application study of the cast-in-situ piles in the karst region, and offer the value reference about the automated test system research of the original pile foundation.

Key Words: The Pile Foundation Imitate Experiment; The Automated Test System;
Data Gathering; Data Processing

第一章 概述

1.1 引言

自动测试系统的产生和发展,是电子测量与现代科技及现代大生产相结合的产物,也是测量科学与计算机科学相互作用的结果。通常把在人工最少参与的情况下,能自动进行测量、数据处理,并以适当方式显示或输出测试结果的系统称为自动测试系统(ATS—Automated Test System)。在这种系统中,整个测试工作通常都是在预先编制好的测试程序统一指挥下自动完成的。

随着科学技术和生产的发展,对电子测量提出了越来越高的要求,六十年代以来,由于电子计算机的广泛应用,在各个领域引起一连串深刻的反响。特别是在室内模拟试验方面,对自动测试的需要显得非常的迫切,主要表现在以下几个方面:

(1) 由于室内模拟试验要充分模拟现场的实际状况,其测试任务复杂、工作量大,对测试系统的功能、性能要求越来越高。在自动测试系统中通常采用计算机控制,具有很强的实时控制、逻辑判断、记忆存储和运算处理能力。这种系统可按事先编制好的程序快速、准确地进行操作,可以自动切换测试点和进行巡回检测,容易适用测试内容复杂、工作量大的要求。另一方面,利用计算机的功能,还可以把一些复杂的测试加以简化。

(2) 要求测试速度快。室内模拟试验在传统的人工测试中,一般只能先取得测量数据,再经过人工分析数据,最后才能根据分析的结果去调整和改进试验过程。但是现代的室内模拟试验往往要求实时检测和自适应处理,在自动测试系统中,用计算机指挥操作,还可以自动校准、自动调整测试点、自动切换量程和频段、自动记录和处理数据。只有采用自动测试,才能提供足够快的速度进行实时测量、实时处理和实时控制,使测试、分析和测试结果的应用融为一体。

(3) 要求测量的准确度高。在室内模拟试验中,如果误差超过一定的范围,测量就变得毫无意义。众所周知,除了由于疏失等原因造成的粗大误差外,测量误差主要有系统误差和随机误差两大类。系统误差是在测量条件改变时按确定规律变化的误差。自动测试系统正可以把这种规律存储起来,在测试过程中加以修正,还可以通过自动校准克服某些系统误差的影响。另一方面,随着测试速度的提高,测量条件变化引起的误差也会感小。单次测量的随机误差没有规律,但多次测量的随机误差是相互抵消的。自动测试系统用快速多次测量求平均值的方法,正可以削弱随机误差。

(4) 要求长期进行定时或不间断测试。在桩基模拟试验中,为了发现一些偶然出现的异常情况或间歇性故障,或者为了监测某些不定期出现的客观现象,要求进行定时的或不间断的测试,如用人工测试不但繁琐、枯燥,而且难于严格按照规定执行。在自动测试系统中,则可以利用计算机控制定时电路,按时开启测试程序。对于要求连续测试或监测的场合,则可在循环程序中进行。运用计算机的逻辑判断和数据处理等功能,还可在测试程序中加入条件转移,中断处理等方式,使测试工作即严格准确又灵活方便。

1.2 自动测试系统的发展与现状^[34, 61, 62, 63, 64, 82, 83, 84, 91, 93, 94]

就某种意义上说,从二十世纪四十年代初期兴起的扫频测试技术,可以说是电子测量技术自动化的先声。这是在某些局部功能上采用模拟式自动控制的一种测量技术。这种技术在解决人工测试所难以完成的一些任务中是行之有效的,而且一直沿用至今,并几经改进。然而这种技术

的缺点是测试功能有限，而且精确度不高。

真正的高速度、高精度、多参数、多功能的自动测试系统，是电子测量技术与自动控制技术和电子计算机技术密切结合的成果，是电子测量仪器数字化与数字信息系统相结合的产物。它的发展大体上可以分为三个阶段。

1.2.1 第一代自动测试系统

早期的自动测试系统多为专用系统，是针对某项具体测试任务而设计的，通常称为第一代自动测试系统。它主要用于要求大量重复测试、要求可靠性高的复杂测试，或者为了提高测试速度及工作于测试人员难于停留的场合。常见的第一代自动测试系统，主要有数据自动采集系统、产品自动检测系统、自动分析及自动监测系统等等。

第一代自动测试系统至今仍在应用，它们能完成大量的、复杂的测试任务，承担繁重的数据分析、信息处理工作，快速、准确的给出测试结果。在测试系统功能丰富、性能提高、使用方便等很多方面比人工测试有明显的改进，甚至可以完成不少人工测试无法完成的任务，显示出很大优越性。

设计和组建第一代自动测试系统也存在不少的困难，主要是系统组建者需自行解决仪器与仪器、仪器与计算机之间的接口问题。当这种系统比较复杂，需要程控的设备较多时，研制工作量很大，所需费用亦昂贵。更重要的是，这种系统适用性不强，改变测试内容一般需要重新设计电路，即它的接口电路不具备通用性，这是第一代自动测试系统最主要的缺点。因此，很快发展了采用标准化通用接口母线的第二代自动测试系统。

1.2.2 第二代自动测试系统

七十年代，自动测试系统解决了标准化的通用母线问题，进而使自动测试进入了目前应用最广泛的第二代。在这种自动测试系统中，各设备都用标准化的接口和母线按积木的形式连接起来。系统中的各种设备，包括计算机、可编程仪器、可控开关等均称为器件或装置（device），各器件均配以标准化的接口功能电路，用统一的无源母线联接起来。这种系统组建方便，组建者不需自己设计接口电路，更改、增加测试内容也很灵活，使用完毕后拆散容易、拆散后的计算机及其他设备又可移作它用，显示了很大的优越性，因此得到了广泛得应用。在众多的自动测试系统中，其中最具有影响力的是 CAMAC 系统、GPIB 系统和 VXI 系统。

一. CAMAC 系统

1969 年，西欧各国从事核科学研究的一些组织在核电子学标准委员会（ESONE）领导下，制定并公布了计算机自动测量和控制仪器及接口系统规范即 CAMAC（Computer Automated Measurement and Control）。它首先被用于高能物理实验室等核科学研究领域，后来逐步推广到电子、冶金、航空、航天等部门。1975 年以后，美国电气与电子工程师学会（IEEE），国际电工委员会（IEC）等组织相继把 CAMAC 定为国际标准，并公布了相应的标准文本。

CAMAC 系统有相当完善的标准化体制，系统以机箱为基本单元，在一个 48cm 宽的机箱中，设有 25 个站位，其中两个站位用于放机箱控制器，其余 23 个站位用于放置功能模块，每个模块通过 86 个接点插头与机箱内的总线（称为数据路）相连。一台计算机（主机）可以与多个机箱相连，箱箱之间的信息传递方式可以是并行传送（16 位或 24 位），字节串行或位串行传送，对于并行传送的系统，一台机最多可连接 7 个机箱，对于串行传送系统最多可连接 62 个机箱。因此，采用 CAMAC 标准体制可以构成一个规模宏大的测控系统。

由于 CAMAC 系统是一种在硬件、软件、结构、电源等方面都具有高度标准化程度的模块化组装式系统，在设计、使用、维护、扩展、改装等方面都有着明显的优点。目前，在世界上有 20 多个国家每年都在研制和出售许多 CAMAC 设备。我国于二十世纪七十年代首先在核物理工业应用方面展开了对 CAM-

AC 技术的研究。现在航天工业部已研制出近百种 CAMAC 功能模块和接口控制器，用于军品

和民品上。我国已将 CAMAC 系统用于导弹遥测、运载火箭、火电厂仿真培训等系统。CAMAC 系统主要用在大型的测试系统中，目前仍有强劲的发展势头。

二. GPIB 系统

目前普遍使用的一种可编程测量仪器的接口系统，是在 1972 年由美国惠普（Hewlett Packard，缩写为 HP）公司首先提出的，后来定名为 HP—IB。以后这套系统陆续为美国电气与电子工程师学会（IEEE）及国际电工委员会（IEC）接受，并正式颁布了标准文件。这套系统在美国称为 IEEE488、GPIB 或 HP—IB，在欧洲、苏联和日本称为 GPIB 或 IEC625。名称不尽相同，但基本容易是一样的，只是作为国际电工委员会的标准 IEC625 的母线系统比 IEEE488 标准及 HP—IB 多了一条地线。有些公司为使自己生产的仪器对两种母线和插头都能适用，还专门生产了一种转换插头，使上述通用接口相互兼容。

目前这套标准接口母线系统（简称接口系统）已我国作为标准采用。作为可编程测量仪器的一种接口系统，我国原电子工业部等几个中央部先后颁布了部级标准，以后又正式定为国家标准（GB249.1~249.2）于 1986 年 1 月 1 日开始实施。在我国科技人员中，通常把这套系统称为 GPIB 或 IEEE488。

GPIB（General Purpose Interface Bus）通用接口总线与 CAMAC 一样是采用通用的测量仪器灵活组态，构成自动测试系统，但其设计思想与 CAMAC 不同，它没有标准的机箱和模块，而是将各种配有符合国际标准的 GPIB 接口的仪器，通过接口总线互连构成自动测试系统。在 GPIB 系统中可以接入多个仪器或装置，这些仪器或装置根据其在系统中所起的作用可以分为三种类型，即控者、听者、讲者。对某些设备而言，它本身可能具有控者、听者、讲者三种功能中的一种、二种或三种。但在某一时刻，只允许其中一种功能起作用，如果系统中有多个装置都有控者功能，则在某一时刻只允许一个控者起作用。GPIB 系统的控制器可以是计算机、微处理器或简单的程序控制器。

GPIB 总线是由 1 根 24 芯的无源电缆组成。GPIB 系统的规模与 CAMAC 系统不同，一个系统最多不超过 15 台仪器。数据传送速率不超过 1Mbyte/s，总线总长度不超过 20m。GPIB 主要用于受干扰较小的实验室及生产测试条件下的台式自动测试系统。它可以把世界上不同国家、不同生产厂家的仪器设备，用通用的标准接口和母线联接起来，避免了以往每次组建系统时都要设计一套专用接口的重复劳动。在这套系统中采用了比特（bit）并联、拜特（byte）串联的方式传输信息，便于用计算机控制。同时由于它通用性强、对联接的仪器设备没有什么苛刻要求，结构简单，性能可靠，操作灵活、方便，体积小，价格亦较低廉，因此作为一项国际标准，它获得了世界各国的广泛承认和采用。近年来作为系统的控制者的微型计算机价格大幅度下降，同时作为 GPIB 系统的接口电路，已生产出多种大规模的集成电路芯片，这些都使这套系统很快地得到普及，与这套系统兼容的仪器、设备的品种和数量也迅速增长。目前世界重要电子仪器厂家的大量产品都带有 GPIB 接口。我国制造的一些微型计算机和电子仪器也开始配备与 GPIB 兼容的功能，已经生产出带这种接口的微型计算机、计算器、数字多用表、电压标准源、多功能校准器、打印机和逻辑分析仪等多种仪器设备，还生产了母线控制器和用于 IBM PC 机、Apple—II 机及其兼容机的 GPIB 接口和相应的软件。

随着 GPIB 系统的发展，它虽然主要是为电子测量仪器组成的自动测试系统而研制出来的，但是它的应用范围正在扩大，后来又陆续颁布了修订和补充的国际标准。IEC 于 1980 年公布了 IEC-625.2-1980，IEEE 于 1987 年公布了 IEEE488.1-1987 和 IEEE488.2-1987。IEEE488.2 的公布是 GPIB 发展的重要动向。它在编码、格式、规程和通用指令等方面的作法和规定，为仪器和计算机之间的通信开辟了一个新领域。自 GPIB 国际标准颁布以来，GPIB 系统得到了空前的发展，其应用领域不断扩展，在自动控制、数据交换、计算机、雷达、导航、通讯、电视、宇航、核物理、过程控制、医疗保健、生物工程和环境保护等很多领域都得到应用。

三. VXI 系统

吸收了 VME 总线高速通信和 GPIB 易于组合的优点, 于 1987 年在测试和仪器领域里又出现了另一种总线自动测试系统, 即 VXI 系统。VXI 是 VME bus Extension for Instrumentation 的缩写, 是 VME 总线标准在仪器领域中的扩展。该系统标准于 1987 年由 Colorado Data System, Hewlett-Packard, Racal-Dana Instruments, Tektronix 和 Wavetek 五家测试公司组成的联合体提出。VXI 系统结构允许不同厂家生产的各种仪器、接口插板或计算机, 以模块形式共存于同一插件机箱中。

VXI 系统的最高数据传输速度可达 40Mbyte/s, 是 GPIB 系统的 40 倍。由于在 VXI 系统中, 仪器等制成模块式, 因此, VXI 具有小型便携、组建和使用灵活方便的特点。VXI 系统将计算机结构引入仪器世界, 自问世以来得到了迅速的发展和推广。从 1987 年的五家公司到 1989 年初仅注册登记接受它的重要仪器制造厂家就已有 100 家左右。预计今后, VXI 系统将在测试领域中占主导地位。目前 VXI 系统还存在不足, 仍很难用于微波产品和大功率设备, 还需要进一步发展软件和仪器控制语言。

CAMAC, GPIB 和 VXI 系统是自动测试系统中常见系统, 这三个系统各有其优点, 但也存在不足。由于三个系统的组建对仪器设备有不同的要求, 因此, 对一台仪器 (或设备) 来说不可能同时满足三个系统的要求。为充分发挥仪器和自动测试系统的作用, 可以将系统联系起来, 形成复合型的自动测试系统。

CAMAC 系统对机架, 机箱和编程要求比较高, 而它所希望使用的有些仪器却只配有 GPIB 接口, 这是可以通过一种称为 GPIB 适配器的 CAMAC 插件, 把 GPIB 系统作为 CAMAC 系统接入, 还可以使用一种特制的 CAMAC 机箱控制器, 把 CAMAC 机箱作为一台 GPIB 设备接入 GPIB 总线。VXI 系统从发展起就很重视与 GPIB 系统的配合, 很多 VXI 系统当主机为外部计算机时, VXI 与计算机之间通常是通过 GPIB 总线加翻译器与 VXI 系统相连。由此充分发挥两个系统的优势。

除了 GPIB, CAMAC 和 VXI 系统, 此外, RS232 是一种串行接口系统。这种接口除用于设备间传递信息外, 还可以与通讯线路等联接, 经过一定的变换进行远距离数据传送。为便于现场维修, 近年来还发展了一些便携式的接口系统, 有代表性的是惠普公司的便携式 HP-IL

(HP—Interface Loop) 接口, 它是一个较简单的串行系统, 用手持计算器作控制器, 对于现场测试和维修比较方便。

1. 2. 3 第三代自动测试系统

第一、二代自动测试系统虽然比人工测试显示出前所未有的优越性, 但是在这些系统中, 电子计算机并没有充分发挥作用, 整个系统和它的工作过程基本上还是对人工测试的模拟。二十世纪七十年代中期提出了第三代自动测试系统的概念, 它把计算机和测试系统更紧密地结合起来, 融合为一体。在第三代自动测试系统中, 用强有力的计算机软件代替传统仪器的某些硬件, 用人的智力资源代替很多物质资源。特别是, 在这种系统中用微计算机直接参与测试信号的产生和测量特性的解析, 即通过计算机直接产生测试信号和测试功能。这样, 仪器中的一些硬件甚至整件仪器都从系统中“消失”了, 而由计算机及其软件来完成它们的功能, 形成一种所谓的“虚拟器” (Virtual Instrument)。在第一、二代自动测试系统中, 包括多件仪器的测试系统所完成的功能, 在第三代中可能由一个以计算机为中心的设备来完成, 所以第三代自动测试系统有时也叫第三代自动测试设备, 即在第三代中有时不再严格区分系统和设备了。它主要由三个部分组成:

(1) 微型计算机。这是第三代自动测试系统或设备的核心, 也是它赖以工作的物质基础。

(2) 通用硬件。这是用来产生激励信号和多种测试功能的带有共性的硬件。它通常包括用来采集数据的的采样器或接收器、A/D 变换器、D/A 变换器、信号放大和驱动电路和程控测试接口等。

进行测试通常需要信号源一类激励仪器和电压表、频率计一类具有测试功能的仪器。在第

三代自动测试系统中, 各类激励信号都先由计算机给出数字信号, 经 D/A 变换形成模拟信号, 再经过一定的放大或驱动电路产生所要求的激励能力。各类测试功能都是先通过对被测信号采样或接收, 再经过 A/D 变换变成计算机能处理的数字信号, 最后通过计算机处理直接得到测试结果。

随着被测对象日益复杂和测试工作量加大, 测量设备与被测件的连接变得费时、费事, 而且与自动测试的高效率不相适应。可编程测试接口主要用来解决被测件与激励信号、测试功能的采样输入端及负载端的连接问题。它可以包含一些适配器、转接器、多路器、变换处理器和一些开关、夹具。在计算机控制下可以迅速地把激励信号、测试功能部分、负载等接到被测件的任意引线上。

(3) 应用软件。它与微计算机的系统软件和其它引入的微机软件配合, 构成第三代测试系统的灵魂。系统中的硬件部分大多是通用的, 配备不同的软件可以产生不同的激励信号和测试功能。有人把第三代自动测试系统的比喻为由微计算机、采样器、微机构成的激励器和可编程测试接口组成的四块积木, 软件相当于摆积木的方法, 采用不同软件就可以摆出不同的效果来。

第三代自动测试系统的出现给电子测量带来了真正革命性的冲击, 在测量原理、仪器设计等很多方面都产生了重大影响。但是第三代自动测试系统还处在开始发展的初级阶段, 同时还存在着跟踪频率或速度不够高的问题有待解决, 因此它的应用不如第二代那么普遍。但是, 充分发挥计算机的作用, 用计算机的软、硬件资源代替测量仪器中的大量硬件, 无疑是电子测量发展的一个重要方向。

1.3 桩基测试技术的发展与现状^[1, 2, 3, 4, 13, 14, 53]

一. 桩基测试的现状

现有的桩基测试技术可以分为两大类, 一类是静力试桩法, 包括无损检测、静载荷试验法、钻桩取芯试验法; 一类是动力试桩法, 包括无损检测、高应变动力试桩法、低应变动力试桩法。

动力试桩法属于无损检测, 它以振动理论、应力波理论为基础, 采用先进的微电子仪器及信号处理技术。高应变动力试桩法分为凯斯法和凯普维普法即波形拟合法, 凯斯法的优点是可以快速地对单桩极限承载力和桩身结构的完整性作出估计, 实现现场的实时分析, 同时可以用来对打桩过程实行监测和监控, 缺点是依赖于凯斯阻尼系数值, 其值越高离散性越大; 两种方法试验过程和采集的信号相同, 波形拟合法并不依赖于凯斯阻尼系数, 而是先假定桩土模型及参数, 以实测速度曲线作为边界条件输入, 求解波动方程反算桩顶力, 并调整桩土模型及参数进行拟合计算, 直到计算力曲线与实测力曲线吻合为止。低应变桩基承载力检测分为稳态机械阻抗法、瞬态机械阻抗法等, 低应变法是通过桩的动刚度和动静对比系数来求得桩的承载力, 它的优点是设备简单、检测速度快、费用低、可以大面积检测, 缺点是必须依赖静载试验以求出动静对比系数, 精度较差。

静力试桩法可靠、直观是常用的桩基承载力检测方法, 我国与许多国家都将静载试验作为标准的试验方法和依据, 置于优先的地位。静载试验的重要性主要体现如下:

1. 静载试验是桩基理论、设计和施工之间的桥梁, 推动和促进三者的渗透和发展。

桩由于受工程地质、施工因素和自身材料性及几何尺寸等因素的影响, 在荷载作用下的受力性能是复杂、多变而难以准确认识的, 桩基理论、设计和施工的发展都受其制约。桩基理论的研究, 设计规范的修正完善, 施工中新工法、新工艺、新机具的应用和发展都离不开试验的检验和验证, 同样它们之间的渗透更离不开试验。随着高科技测试手段的应用, 如高精度的数值采集仪现场测试, 防水绝缘工艺的进步, 桩身内埋测试技术日益成熟, 已为进一步探索桩的作用机理提供了条件。

2. 静载试验为基础设计提供科学依据, 也是桩基质量检测的有效手段, 对桩基工程实现安

全、经济的原则有积极意义。

静载试验的目的之一就是确定单桩承载力，为设计提供科学依据，设计者能够依据试验结果，针对地质条件和施工情况等进行优化设计，在保证工程安全和质量的前提下，节约大量基建投资。同时静载试验作为桩基质量检测的有效手段，可以避免工程潜在隐患和质量事故的发生，为质量问题和事故处理提供依据和帮助。

3. 静载试验为新工法、新工艺和新桩型的推广应用提供了有力证据，促进了施工技术的向前发展。

桩基施工的各种新工法、新工艺和新桩型的不断涌现，其效果需要在实践中得以证实，而静载试验不仅能为此提供证据，也能发现存在的问题和不足，促进其不断改进和完善。

二. 存在的问题

动力试桩法在国内外发展很快，但还存在不少的问题，如：小应变桩基完整性检测中缺陷的大小还不能定量分析，只能靠经验判断；小应变动测桩基承载力依赖于静动对比系数，必须建立各种地质条件，各种桩型条件下的静动对比系数数据库；目前，国内外比较广泛地应用动力方法测定桩的承载力，然而由于动荷载作用时间很短，土的变形和强度性质在动静两种状况下相差甚远，所以动测方法都是间接的和近似的，一般地只能作为一个参考依据。

桩静荷载试验作为目前任何确定单桩承载力的替代方法的对比标准，但也有缺陷，如：桩的现场静载试验一般以千斤顶进行加卸载，其千斤顶要进行严格和经常性的标定，才能减小千斤顶活塞与缸体磨损、油路损失等造成的误差；手动液压加载系统靠观测压力表值变化而补偿，且施加荷载是锯齿形波动荷载的不足；工作人员要按照试验规范每隔一定的时间进行加卸载，并人工记录试验数据，由于静载试验时间很长，这会给工作人员带来一定的劳动强度和疲劳，很容易造成不必要的误差；从现场记录的数据要经过人工的处理或输入预先编好的数据处理程序中进行处理，才能进行试验分析。

1.4 本课题研究的的目的和意义

灌注桩在岩溶发育地区的应用比较广，是一种常见的施工方法。目前对灌注桩在施工工艺上已有一定的经验，但是针对地质条件比较复杂的岩溶地层的嵌岩灌注桩，国内外进行系统研究的工作并不多，同时各种规范制定的标准处理这一问题也比较含糊，对一些参数的确定一般是凭经验而定，缺乏一定理论依据。尤其是关于灌注桩在岩溶发育地区的嵌岩深度，岩溶顶板安全厚度没有做过深入具体的工作。岩溶发育地区桩基模拟试验是通过自行设计制造的室内大型物理模型，对其进行静载试验，并利用自动测试系统采集和处理数据，从而系统地分析桩基承载力与嵌岩深度和岩溶顶板厚度的关系，得出精确的理论公式。

由于桩的静载试验存在上述的问题，为了使得其数据采集和处理实现自动化，并得到精确的、有用的试验数据，就有必要对桩基和岩溶顶板组成的物理模型的自动测试系统进行设计和研究。本课题主要研究和解决的问题有：根据自行设计制造的室内大型物理模型（用模拟材料比较真实地模拟现场的岩性特点），进行自动测试系统方案设计；整套测试系统采用自动化智能控制；系统能自动地修正系统误差，以此来提高系统的测试精度；使得数据采集和成果处理完全实现自动化，以此来减少试验人员的劳动强度，并提高测试精度；通过大量的试验为岩溶发育地区桩基应用研究提供精确的试验数据，同时也为桩的现场静载试验自动测试的实现和精度的提高提供一定的参考价值。

第二章 岩溶地区桩基模拟试验概况

我国岩溶发育地区分布较广，并且近一些年来国家正在加大基础设施的建设，在工民建、路桥等工程建设之中，经常会遇到复杂岩溶地层，这就给工程施工带来了一系列的问题。在岩溶发育地区，桩基应用目前还是很广泛，对不同的地质条件，工程设计、施工的好坏不但影响整个工程的进度，质量，而且有时会造成一些不必要的浪费。如何合适的选择桩型，桩端持力层，确定最佳嵌岩深度与岩溶顶板安全厚度具有重要的理论意义和现实意义。

目前国内外对于嵌岩灌注桩的研究工作大都停留在研究桩本身的承载力方面，以及桩与桩周土的作用机理方面，很少有人在室内进行大型模拟试验，特别是对于岩溶发育地区的嵌岩灌注桩进行系统研究工作的并不多，嵌岩桩所嵌岩的岩体特性对嵌岩桩工作特性影响的研究国内外报道极少。国内曾经有过研究者利用离心模型研究桩的承载特性。但是考虑到离心模拟机的结构复杂及其造价很高等不利因素，如果能合理的设计一种非离心式的物理模型，无疑为以后的工作即在桩的相关试验方面提供了一条简单、可靠和成本较低的捷径，同时为桩的模拟试验提供了开阔的前景，也为现场应用提供了有效的理论依据。

岩溶地区桩基模拟试验主要是通过正确的评价岩溶发育地区的现场岩性特点，自行设计制造物理模型，应用相似理论，用相似材料模拟岩体特性。经过大量的试验，解决岩溶发育地区桩在一定的荷载下的最佳嵌岩深度以及岩溶顶板的安全厚度等问题。为岩溶发育地区的工程设计、工程施工、监理提供科学依据，为岩溶地区的桩基处理提供经济合理的方案，也可以为国家制定有关标准而提供试验数据。

2.1 模型的简化^[17, 18, 24, 26]

为了有效地模拟岩溶发育地区灌注桩的受力、变形情况，以及桩与岩层顶板厚度、不同嵌岩深度、不同跨度等因素之间的关系，就必须在室内建立合理的能反映现场特性的桩基物理模型。但由于岩溶发育地区地形地貌，地质条件的复杂多变性，要做到岩性的准确模拟，毫无疑问其中的工作量相当大，并且也没有必要，因此在考虑一部分主要因素的前提下，暂时不考虑或忽略另一些次要因素的影响，这样我们就可以使模型简化，而又不失其达到相似模拟的最终目的。

一般地嵌岩灌注桩的承载力主要由桩与土间的侧摩阻力，嵌岩段的侧摩阻力（嵌固力）及桩端阻力三部分组成，其公式如下：

$$Q_s = \frac{Q_{sw} + Q_{rw}}{K_s} + \frac{Q_{bw}}{K_b} \quad (2-1)$$

式中： Q_{sw} 、 Q_{rw} —分别为覆盖土层和嵌岩段的总极限侧阻力；

Q_{bw} —桩底总极限端阻力；

K_s 、 K_b —安全系数。

(1) 在完整基岩的短粗挖孔嵌岩灌注桩 ($l/d \leq 8-10$)，且桩底支撑于完整基岩时，竖向荷载下的位移很小，覆盖土层侧摩阻力不能发挥令 $Q_{sw}=0$ ，则：

$$Q_s = \frac{Q_{rw}}{K_s} + \frac{Q_{bw}}{K_b}$$

$$-\frac{f_r}{K_s} \psi_s U L_r + \frac{Q_{bu}}{K_s} \quad (2-2)$$

式中： f_r —岩石饱和单轴极限抗压强度；

k_s —安全系数，一般取 $k_s=2$ ；

U —嵌岩段桩周长， $U=\pi d$ ；

L_r —嵌岩段长度；

ψ_s —比例系数；

(2) 完整基岩上的钻孔嵌岩灌注桩，由于桩底“软垫”的压缩足已调动覆盖土层的侧阻力，也就是说侧阻先于端阻产生。

$$\begin{aligned} Q_a &= \frac{Q_{su} + Q_{ru}}{K_s} + \frac{Q_{bu}}{K_s} \\ &= \frac{U}{K_s} (q_{su} L_s + \xi_s f_r L_r) + \frac{Q_{bu}}{K_b} \end{aligned} \quad (2-3)$$

式中： q_{su} —覆盖土层的极限侧阻，可以根据土层性质求出；

L_s —覆盖土层中的桩长；

ξ_s —折减系数。

考虑到设计的物理模型的普适性，试验分两阶段进行，第一阶段桩周土侧摩阻力暂不考虑，或者以总荷载减去根据现场静载试验分析得出的桩周土侧阻力以后，再考虑桩嵌岩段侧阻力与桩端阻力；第二阶段考虑桩周土侧摩阻力的作用。而桩基稳定性关键取决于溶洞顶板灰岩的各项强度指标，同时桩的荷载，桩径，溶洞跨度，裂隙发育程度等因素对桩基的稳定性也有一定的影响。在此我们暂时把岩溶洞顶板看做是完整的基岩，为了研究的方便简化为一完整的矩形板，矩形板为均质各相同性的介质，其边界条件为两对边简支，另两对边自由，其受力状态可以简化为中心受集中荷载的简支梁来表示。所以试验的第一阶段，模型可以简化为短桩形式的端承桩，模拟桩基的承载力可以由式(2-2)表示；第二阶段在第一阶段的基础上再进行土层模拟，桩基的承载力可以由式(2-3)表示；同时，试件的受力分析可以根据中心受集中荷载的简支梁来进行。因此在此桩基模拟试验中需要测试的参数有：桩顶荷载、桩在某一荷载下的变形量、试件承受的荷载、试件在某一荷载作用下的变形量、桩的侧摩阻力以及在某一荷载下试件内部的应力应变。

2.2 模型的理论基础^[15, 15, 16, 18, 22, 56]

物理模型设计的关键部分是如何确定适当的几何比、动力相似比及运动相似比，这就涉及到相似理论。

一般的关于岩土结构的物理模型所涉及的问题均为三维问题。对于三维问题如何用数学方法来推导相似比，进行模拟设计，目前还没有谁能给出一个合理的结论。事实上，很多的三维问题通过简化便可转为二维问题来解决，这种思维方法在结构、力学等工程问题方面是一种有效的途径。因此，我们所设计的岩溶地区桩基模型同样可简化为二维平面问题来解决。根据相似原理，其表述如下：若有两个系统相似（模型与原型），则它们的几何特性和各个对应的物理量必然互成为一定的比例关系。这样，就可以通过试验测定某一个系统（模型）的物理量，再按一定的比例推求另一系统（原型）的对应物理量。

利用弹性力学研究弹性结构平面问题时，必要的方程式是平衡方程和变形协调方程。具体方程式如下：

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial X} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial Y} &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial Y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial X} + \gamma &= 0 \\ \left(\frac{\partial^2}{\partial X^2} + \frac{\partial^2}{\partial Y^2} \right) (\sigma_x + \sigma_y) &= 0 \end{aligned}$$

式中 σ_x, σ_y 一单元体上的正应力；

τ_{xy} 一单元体上的剪应力；

γ 一容重（在计算浅部地压时可以忽略）。

对于原型，有

$$\frac{\partial(\sigma_x)_P}{\partial X_P} + \frac{\partial(\tau_{xy})_P}{\partial Y_P} = 0 \quad (2-4)$$

$$\frac{\partial(\sigma_y)_P}{\partial Y_P} + \frac{\partial(\tau_{xy})_P}{\partial X_P} + \gamma_P = 0 \quad (2-5)$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial X^2} + \frac{\partial^2}{\partial Y^2} \right) [(\sigma_x)_P + (\sigma_y)_P] = 0 \quad (2-6)$$

$$\text{设应力相似常数 } C_\sigma = \frac{(\sigma_x)_P}{(\sigma_x)_m} = \frac{(\sigma_y)_P}{(\sigma_y)_m} = \frac{(\tau_{xy})_P}{(\tau_{xy})_m}$$

$$\text{容重相似常数 } C_\gamma = \frac{\gamma_P}{\gamma_m}$$

$$\text{几何相似常数 } C_l = \frac{X_P}{X_m} = \frac{Y_P}{Y_m}$$

根据上列关系式，可推导模型的平衡方程和变形协调方程，由（2-4）和（2-5）式得：

$$\frac{C_\sigma}{C_l} \left[\frac{\partial(\sigma_x)_m}{\partial X_m} + \frac{\partial(\tau_{xy})_m}{\partial Y_m} \right] = 0 \quad (2-7)$$

$$\frac{C_\sigma}{C_l} \left[\frac{\partial(\sigma_y)_m}{\partial Y_m} + \frac{\partial(\tau_{xy})_m}{\partial X_m} \right] + C_\gamma \gamma_m = 0 \quad (2-8)$$

对于模型，必要的方程式是

$$\frac{\partial(\sigma_x)_m}{\partial X_m} + \frac{\partial(\tau_{xy})_m}{\partial Y_m} = 0 \quad (2-9)$$

$$\frac{\partial(\sigma_Y)_m}{\partial Y_m} + \frac{\partial(\tau_{XY})_m}{\partial X_m} + \gamma_m = 0 \quad (2-10)$$

若要模型与原型相似，则(2-4)式与(2-9)式应相等，(2-5)式与(2-10)式应相等。也就是(2-7)式与(2-9)式应相等，(2-8)式与(2-10)式应相等。

根据(2-7)与(2-9)式应相等的条件，可求得相似指标：

$$\frac{C_\sigma}{C_l} = \text{任意常数} \quad (2-11)$$

(2-8)式可改写成：

$$\frac{C_\sigma}{C_l C_y} \left[\frac{\partial(\sigma_Y)_m}{\partial Y_m} + \frac{\partial(\tau_{XY})_m}{\partial X_m} \right] + \gamma_m = 0 \quad (2-12)$$

将上式与(2-9)式对比，可求得一个相似指标为：

$$\frac{C_\sigma}{C_l C_y} = 1 \quad (2-13)$$

(2-13)式可换写成相似判据：

$$\frac{\sigma_P}{l_P \gamma_P} = \frac{\sigma_m}{l_m \gamma_m} = \Pi \quad (2-14)$$

(2-11)式表示，在不考虑体积力的条件下，应力相似常数 C_σ 与几何相似常数 C_l 无制约关系，

可任意选取，即 C_σ 与 C_l 的任何比值都符合相似条件。因此，用平面弹性模型进行应力分析时，如忽略体积力不计，就可不考虑相似指标所限定的制约关系。只要保证模型与原型的几何相似(包括载荷分布条件、约束条件等)，即可直接根据选定的应力相似常数将模型中的应力换算成原型应力：

$$\sigma_P = C_\sigma \sigma_m$$

(2-13)式表示，在考虑体积力条件下，为了满足平衡微分方程的要求，应力相似常数 C_σ 、几何相似常数 C_l 与容重相似常数 C_y 应当相互制约，即其中的两个自由选取以后，第三者就不能自由选取，必须根据相似指标与两个已选定的相似常数来求得。

在这种情况下，可由相似判据(2-14)式获得应力的换算公式如下：

$$\sigma_P = \sigma_m \left[\frac{l_P \gamma_P}{l_m \gamma_m} \right] \quad (2-15)$$

在桩基模拟试验中考虑到：

$$C_\sigma = C_E C_\epsilon \quad (2-16)$$

因为应变相似常数 C_ϵ 为无量纲的物理量，且始终为1，故有 $C_E = C_\sigma = C_y C_l$

相似第二定律认为“约束两相似现象的基本物理方程可以用量纲分析的方法转换成用相似判据 n 方程来表达的新方程，即转换成 n 方程。两个相似系统的 n 方程必须相同。”

通过以上一系列的方程关系式和量纲分析，可推导：

$$C_\sigma = \frac{F_p / S_p}{F_m / S_m} = \frac{F_p / l_p^2}{F_m / l_m^2} = \frac{F_p l_m^2}{F_m l_p^2} \quad (2-17)$$

$$\text{即 } F_m = \frac{F_p}{C_\sigma C_l^3} \quad (2-18)$$

式中 F_p ——原型的荷载；
 F_m ——模型的荷载；
 S_p ——原型的面积；
 S_m ——模型的面积。

抗拉强度极限 σ_c 与抗压强度极限 σ_t 的量纲与应力 σ 一致，因而选择模型材料的强度指标时，可根据以下公式换算：

$$[\sigma_c]_m = \frac{l_m \gamma_m}{l_p \gamma_p} [\sigma_c]_p \quad (2-19)$$

$$[\sigma_t]_m = \frac{l_m \gamma_m}{l_p \gamma_p} [\sigma_t]_p \quad (2-20)$$

根据相似第三定律（相似存在定律）认为“只有具有相同的单值条件和相同的主导判据时，现象才互相相似”。

单值条件为：

- (1) 原型与模型的几何条件相似；
- (2) 在所研究的过程中具有显著意义的物理常数或比例；
- (3) 两个系统的初始状态相似；
- (4) 研究期间两个系统的边界条件相似。

主导相似判据是指在系统中具有重要意义的物理常数和几何性质所组成的判据。

2.3 模型设计^[15, 18, 19, 56]

一. 相似材料物理力学性能指标的确定

根据现场岩样的室内试验，现场灰岩为微晶灰岩，粒径小于 0.05mm。岩石中节理发育，岩石破碎，沿裂隙充填着大量方解石脉，方解石脉为两期侵入，降低了灰岩强度。根据室内试验，灰岩的强度参数值波动较大，主要原因为方解石脉的不规则分布。采用 Grubbs 准则对每个数据进行检查，将剩余的数据进行平均。灰岩岩性指标如下表：

表 2-1 灰岩岩性指标

密度 (g/cm ³)	抗压强度 Mpa	弹性模量 10 ⁴ Mpa	抗弯强度 Mpa	拉压比	软化系数
2.67-2.72	32.2-125.07	1.8-8.0	12.41-16.46	1/2.6-1/7.6	0.92

根据相似原理，已知 $(\sigma_c)_p, (\sigma_t)_p, (\sigma_{\text{弯}})_p, E$ 后，选取几何相似比 $C_l = 10$ ，经试验分析容重

相似比 $C_\gamma = 1.3$ ，根据式 (2-13) 相似指标可得

$$C_\sigma = C_\gamma C_l$$

$$\therefore C_\sigma = 13$$

$$\frac{(\sigma_c)_P}{(\sigma_c)_m} = \frac{(\sigma_1)_P}{(\sigma_1)_m} = \frac{(\sigma_{\text{弯}})_P}{(\sigma_{\text{弯}})_m} = \frac{E_P}{E_m} = 13$$

根据以上分析可以确定相似材料的物理力学性能指标如下表所示：

表 2-2 相似材料的物理力学性能指标

	密度 (g/cm ³)	抗压强度 Mpa	弹性模量 10 ⁴ Mpa	抗弯强度 Mpa	拉压比	软化系数
灰岩	2.67-2.72	32.2-125.07	1.8-8.0	12.41-16.46	1/2.6-1/7.6	0.92
相似材料	2.00-2.09	2.48-9.62	0.14-0.62	0.95-1.27		

二. 相似材料的选择

目前选用的模型材料大多数是混合物。这种混合物由两类材料组成，一类是作为胶结物质的材料，主要有石蜡、水泥、石灰、水玻璃、碳酸钙、石膏、树脂等，另一类是作为骨架的惰性物质的材料，主要有砂、尾砂、粘土、铁粉、铅丹、重晶石粉、铝粉、云母粉、软木屑、聚苯乙烯颗粒、硅藻土等。

实际上选择一种材料要同时完全满足表 2-2 中的力学性能是不可能的，在岩溶发育地区桩基模拟试验中，我们把模型材料的抗弯强度作为主要的力学指标考虑，选用细砂作为骨料，水泥和石膏作为胶结材料进行岩性的模拟试验，选择出模型材料的最优配方比，满足相似条件，以便于制作模型。

三. 材料的配比及试件的尺寸

根据相似材料的室内小样试验和所取的相似比我们选用了如表 2-3 所示的材料配比和试件的尺寸。

表 2-3 材料的配比及试件的尺寸

试验顺序	材料配比	试件尺寸 (长×宽×厚) m	小样的抗压强度 Mpa	小样的弹性模量 10 ⁴ Mpa	小样的抗弯强度 Mpa
第一批	555	1# (1.2×1.0×0.2)	2.09	0.25	0.7
		2# (1.5×1.0×0.3)	2.28	0.32	1.2
		3# (1.6×1.0×0.4)	2.21	0.77	1.3
第二批	482	1# (1.32×0.6×0.2)	10.1	0.96	2.35
		2# (1.52×1.0×0.2)			
		4# (1.72×1.0×0.2)		0.74	
		5# (1.72×0.6×0.2)		1.24	
	6# (1.32×0.6×0.3)	8.4	1.06	1.63	
	582	3# (1.52×1.0×0.2)	9.25	0.72	2.3
	573	7# (1.52×1.0×0.2)	6.0	0.86	2.28
	555	8# (1.52×1.0×0.2)	4.4	0.72	1.55
	564	9# (1.52×1.0×0.2)	4.3	0.92	1.14
	682	10# (1.52×1.0×0.2)	5.0	0.83	1.77

续表 2-3

试验顺序	条件说明		试件编号	试件长度 (m)	试件宽度 (m)	试件厚度 (m)	嵌岩深度 (m)	
第三批试件	固定试件的抗压强度和厚度, 做不同跨度的试验。		1#	1.12	0.6	0.2	0	
			2#	1.22				
			3#	1.32				
			4#	1.52				
			5#	1.72				
			6#	1.87				
	固定试件的抗压强度和跨度, 做不同厚度的试验。		7#	1.52	0.6	0.15	0	
			8#			0.2		
			9#			0.25		
			10#			0.3		
			11#			0.35		
			12#			0.4		
	固定试件的抗压强度、跨度和厚度, 做不同嵌岩深度的试验。		13#	1.52	0.6	0.3	0.02	
			14#				0.05	
			15#				0.03	
			16#				0.10	
			17#				0.15	
			18#				0.32	
			19#				0.35	
备注: 在第三批试件中, 相似材料的配比号为 673, 室内小样试验的抗压强度为 2.7MPa, 抗弯强度为 0.7 MPa。								
第四批试件	条件说明	试件编号	试件尺寸 (长×宽×厚) m	抗压强度	弹性模量	抗弯强度	嵌岩深度 (m)	
				Mpa	10 ⁴ Mpa	Mpa		
				1#	4	0.699		1.3
				2#	2.6	0.689		0.65
				3#	1.52×1.0×0.2	0.83		1.62
				4#		10.5		0.941
	5#	6.9	0.78	1.53				
	6#	0.85	1.66					
	由于第三批试件的嵌岩试验效果不理想, 重做。	7#	1.2×1.0×0.19	3.5	0.42	0.88	0.19	
		8#	1.2×1.0×0.4	2.8	0.41	0.87	0.4	
		9#	1.52×1.0×0.2	3.2	0.35	0.76	0.12	
10#		1.52×1.0×0.2	3.9	0.33	0.72	0.15		
11#		1.52×1.0×0.3	2.2	0.193	0.47	0.3		

第三章 自动测试系统方案设计

3.1 测试的目的

在这次岩溶发育地区桩基模拟试验中,由第二章可知其主要目的是通过对不同厚跨比的试件的破坏性试验,以及对桩的嵌岩深度和侧摩阻力的研究,从而得出顶板在破坏时,试件顶板所受的竖向荷载、试件厚跨比和试件的位移量的理论关系式。同时还要总结出岩溶发育地区灌注桩的承载力与位移量的经验公式。

由上述目的可知这次桩基模拟试验主要量测以下几个参数:桩顶位移量、桩顶荷载、桩端阻力、试件顶板的位移量;如果试验条件允许的话,还必须量测桩在各土层的摩阻力和嵌岩段的摩阻力、桩的横向位移以及在某一荷载下试件内部的应力应变等。

3.2 自动测试系统工作模式^[34, 7982, 83, 92]

自动测试就是对研究对象的整个测试过程包括数据采集、数据分析处理与测试结果的显示输出等等都是在计算机的统一控制下自动完成的。图 3-1 示出了一种典型的自动测试系统的组成框图。这里,实现测试过程的一切操作都是在计算机控制下自动完成的,人的作用仅限于编制必要的测试程序或做一些必要的操作。

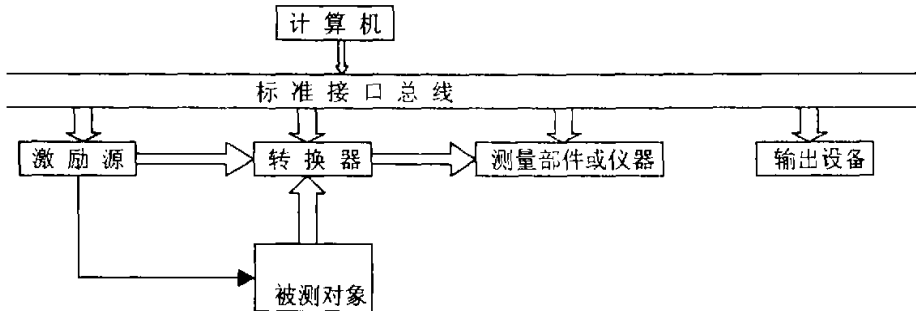


图 3-1 自动测试系统的组成

实际上自动测试系统是自动测试技术设备的总体概念,它包括硬设备和软设备,系统也可大可小。但不论那种情况,自动测试系统的工作模式都是大体相同的,这就是:

- (1) 用传感器将电的或非电的被测物理量变换成电量或电信号,进而进行必要的放大和预处理,使之达到自动测试仪器所能接收的水平;
- (2) 实现对被测信号的自动采集和数据处理;
- (3) 按规定的方式对测试结果作出必要的判别和反馈,并能将测试结果自动显示出来;
- (4) 系统具有必要的自检能力;
- (5) 有标准接口,可随时参与组建成规模更大的测试系统。

3.3 方案设计^[3, 6, 13, 14, 18, 19, 56, 60]

解决各种工程的力学问题，通常有理论计算分析和试验分析两种方法，各种试验分析方法和技术经长期发展形成了试验固体力学。其任务是采用试验方法测定结构的各种力学参数，如应力、应变、位移、荷载等，用以解决固体力学中的工程结构强度问题，桩基模拟试验就属于固体力学试验。试验固体力学包括很多方法，主要有应变电测法、光弹性法、脆性涂层法、云纹法等。其中应变电测法具有测量精度高、易于组成自动测试等优点，在岩溶地区桩基模拟试验的准备阶段我们采用了此方法，对测试系统进行了如下几种方案设计：

一. 方案一

加载系统采用油压千斤顶加载，用并联于千斤顶的高精度压力表测定油压，并由事先千斤顶率定曲线换算荷载，同时在千斤顶上放置压力环或压力传感器，实现双控校正。通过压力环或压力传感器，可以读出加在桩顶的荷载值。由第二章的模型简化可知，试件顶板上的荷载值可以通过桩顶荷载与桩体重量之和求得，也可在桩端安置土压力盒来进行测量。

在荷载作用下，桩的位移量可以通过电测位移计来进行测量。如果要模拟桩在土层中的承载特性，就必须在桩身内埋测试元件，可以采用电阻式应变计或弦丝频率式应变计，以优质多芯电缆线引出。或者沿桩身的不同标高处预埋不同长度的金属杆和测杆，即可用千分表量测测杆趾部相对于桩顶处的位移量，经计算而求出应变与荷载值。

试件顶板位移量的量测，可以用带有游标尺和千分表的 DDJ 型测杆，用光电信号转换装置来代替千分表的圆盘，当活杆有位移时，便输出相应的电脉冲，通过对电脉冲计数可获得位移量，并可以实现远距离自动检测与报警，这类带光电转换装置的测杆量程为 0—200mm，其精度可精确到 0.01mm。其试验装置如图 3-1 所示。

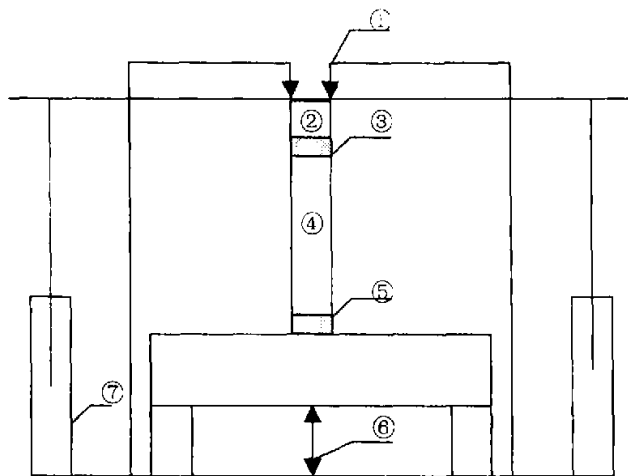


图 3-1 测试系统方案一的装置

图中：①电测位移计 ②千斤顶 ③压力传感器
④模拟桩 ⑤土压力盒 ⑥带有光电转换装置的 DDJ 测杆
⑦加载反力装置的油缸

二. 方案二

在此方案中所有的传感器都采用光纤应变式传感器，根据我们所需要测试的参数要求，其中，桩顶荷载由安装在桩顶的荷载传感器来检测；试件的承载力也就是桩端阻力（桩要嵌岩时）

通过预埋在桩底的土压力盒来检测；桩体和试件的位移用位移传感器来检测，为了提高试验的准确度，在桩顶和试件顶部对称地安装两个位移传感器；由于光纤应变式传感器没有内埋式，所以试件内部的应力应变，可以通过在制造试件时预留一些细孔，以便粘贴应变计。应变计的粘贴可以参照桥梁设计规范对于完整的水平顶板，载荷按 30° - 35° 扩散角向下传递，来布设试件内部应变计的粘贴位置。各测试元件的布设如图 3-2 所示。

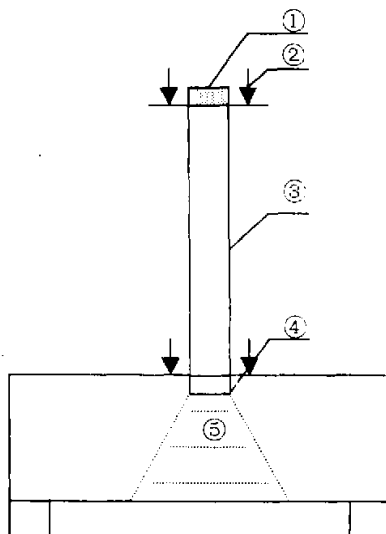


图 3-2 测试系统方案二的装置

图中：①载荷传感器 ②位移传感器 ③桩
④土压力盒 ⑤应变计粘贴区

三、方案三

在方案二中由于要在试件顶板中预留细孔以便粘贴应变计，这破坏了试件顶板的完整性，会给试验带来很大的误差。在此我们不采用光纤应变计，而使用可以内埋的应变计。其参数的检测方法跟方案二相同，只是在制造试件顶板时，在载荷按 30° - 35° 扩散角向下传递的区域内预埋一些应变计。各测试元件如图 3-3 所示。

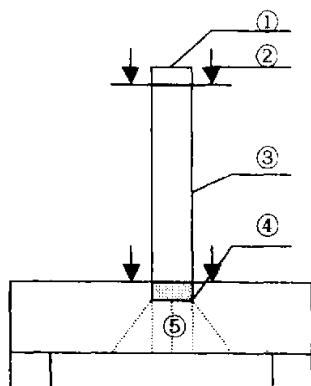


图 3-3 测试系统方案三的装置

图中：①、②、③、④跟方案二相同
⑤应变计的预埋区

四. 方案四

在方案二中，由于试件顶板的预留细孔破坏了试件顶板的完整性，就采用了方案三，但是在方案三中采用内埋应变计，这会人为地增强试件顶板的强度，就会使得我们的模拟试验带来很大的影响，所以在此方案中，我们在试件顶板内不粘贴或预埋任何的应变计。其它参数的测试跟方案二、三相同，其试验装置如图 3-4 所示

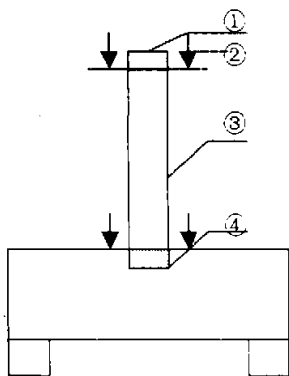


图 3-4 测试系统方案四的装置

图中：①、②、③、④跟方案二相同

在试验的第二阶段由于考虑了桩周上的作用，所以在第一阶段的基础上还需要检测桩土间的摩阻力。其方法是在桩身所穿过土层的各交界面处，预埋应变计和钢筋计，从而量测混凝土的应变和钢筋的应变，综合确定桩体应变，求出桩在各段处的内应力，再根据桩体平衡关系，如图 3-5 所示，就可以求出桩在各土层的摩阻力。同时由埋设在桩底的土压力盒，可以求出嵌岩段的摩阻力。其桩体内应变计和钢筋计的埋设如图 3-6 所示。

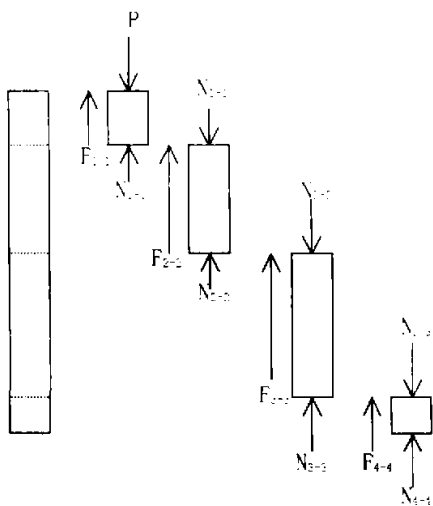


图 3-5 桩体平衡关系示意图

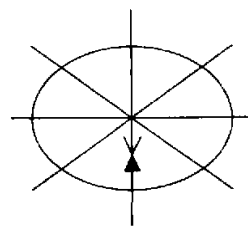


图 3-6 桩体横截面测试元件布设图

图中：粗黑箭头 是钢筋计
细黑箭头 是应变计

3.4 方案选择

上述的四个方案设计各有优缺点，下面分别叙述：

方案一：各参数的测量方法比较简单，易于操作，所用的传感器都比较常见，并且价格也很便宜，各传感器与应变仪相连就可以接到计算机上，编写相应的测试程序后，就可以进行自动测试了。但是此测试方案存在很多缺陷：①带有游标尺和千分表的 DDJ 型测杆，要用光导信号转换装置来代替千分表的圆盘后，才能进行自动测试，这样就需要自己设计一个光电信号转换装置；②在岩溶地区桩基模拟试验中，要对试件顶板进行破坏性试验，而 DDJ 型测杆安装在试件的正下方，破坏后的试件会压坏 DDJ 型测杆；③ DDJ 型测杆的精度只能达到 0.01mm，在载荷作用下而模拟材料的变形通常很小，只能以 μm 计；

方案二：由于对测试系统精度的考虑，在此方案中我们采用了光纤传感器，并准备选用法布里——珀罗光纤应变传感器，它是以法布里——珀罗干涉仪 (FPI) 为基础设计的。FPI 基本上由两块彼此相对的镜片组成，镜片之间的间隙叫做空腔长度。在 FPI 中反射的光线都精确地按照空腔长度进行波长调制。由于精心设计的 FPI 传感器把应变、温度、负载或压力转换为空腔长度的变量。所以使用 FPI 技术时，成功的关键就是要找到一种切实可行的办法来准确、可靠地测量法布里——珀罗空腔长度值。白光互相关器能以惊人的准确性和线性对法布里——珀罗空腔长度进行绝对测量，并有着很高的稳定性。

其 FPI 的白光检测方法如图 3-7 所示，从一个宽带光源发出的光被射入 2×2 耦合器的一个分路，并被导向法布里——珀罗传感器。由传感器进行波长调制的光信号被反射回光纤传感器的续出装置。并聚焦在一条直线上，穿过白光互相关器，最后被一个直线式电荷耦合器件 (CCD) 阵列所检测。可以把白光互相关器看成一个空间分布的法布里——珀罗的空腔长度，空腔长度在其中沿横向位置变化。对着 CCD 阵列，每一个像素都和一个预先确定的类似法布里——珀罗的空腔长度相联系。因此，这个装置的作用就象一个光学互相关器，而空腔长度则在空间内变化。被法布里——珀罗传感器反射的光极大部分被传送到 CCD 阵列的一个像素上，一个长度为 $d\mu\text{m}$ 的法布里——珀罗空腔与这个像素相联系，也就是传送到空间分布的法布里——珀罗空腔长度等于 $d\mu\text{m}$ 的横向位置上。如图 3-8 所示，法布里——珀罗空腔长度的变化被转换为一个像素的位移，这个像素是由最大的光传输信号形成的。只要白光互相关器极其稳定，就能对 FPI 传感器的空腔长度进行准确可靠的测量。

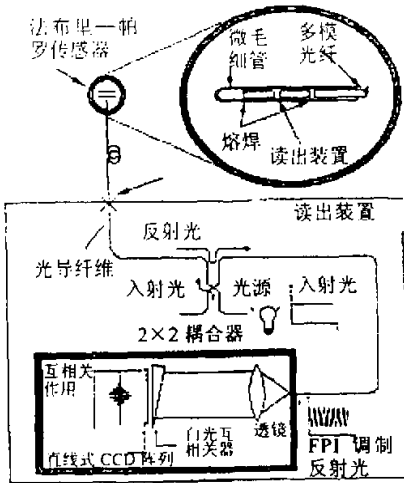


图 3-7 白光检测方法

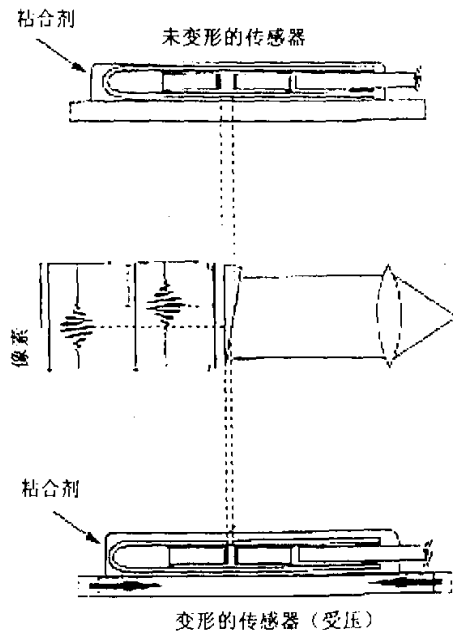


图 3-8 光纤传感器检测示意图

此类光纤传感器的精度可达到 $0.001\mu\text{m}$ ，从而使分辨率达到满刻度应变范围的 0.01%，完全

能满足我们的精度需要,并能使试验数据更为准确。此类光纤传感器与 FIT—100i 信号调节器相连后,很容易实现自动测试, FIT—100i 是一种具有快速取样率的多通道光纤信号调节器,它非常适合实验室应用,它可象万用表那样按数字式操作,也可象示波器那样按图形方式显示。但此测试方案也存在一些缺陷:①由于光纤传感器没有内埋式的,所以在此方案中我们采用了在试件顶板中预留细孔,以便粘贴光纤应变计,这样会破坏试件顶板的完整性,从而给试验带来很大的误差;②尽管光纤应变式传感器的精度很高,并且很容易实现自动测试,但是整套测试的价格很昂贵(初步估计约二十万左右)。

方案三:在方案二中由于预留的细孔破坏了试件顶板的完整性,在此方案中我们采用了内埋式的应变计,为了尽量地减少人为增加的试件顶板强度,我们准备选用 BH120—02AA 箔式埋入式环氧基底的应变计,此应变计的栅长×栅宽为 0.2mm×1.0mm,基底尺寸为 2.4mm×2.4mm。此方案与方案二相比可以保证试件顶板的完整性,其整套测试的价格相对来说要低得多,但是测试系统的精度没有方案二高,并且内埋式的应变计尽管尺寸比较小,但一样会增加试件顶板的强度,给试验数据带来一定的系统误差。

方案四:岩溶地区桩基模拟试验的主要目的是通过对不同厚跨比的试件的破坏性试验,以及对桩的嵌岩深度和侧摩阻力的研究,从而得出顶板在破坏时,试件顶板所受的竖向荷载、试件厚跨比和试件的位移量的理论关系式。同时还要总结出岩溶发育地区灌注桩的承载力与位移量的经验公式。在试件顶板中内埋应变计主要是为了了解试件顶板在载荷作用下内部的应力与应变的变化情况,但应变计的粘贴或内埋会给试验带来一定的系统误差,并且岩石在载荷作用下内部的应力应变的变化在相关的岩石力学试验中得到验证,因此在此方案中我们暂时不考虑。从而使得测试系统变得非常的简单,如图 3-4 所示。此方案与上述几个方案相比较,具有很大的优越性,主要表现在:①在能够完成测试任务的前提下,测试系统最简单;②能保证试件顶板的完整性和它的模拟强度,使模型的简化条件能得到满足,并能提高试验数据的准确性;③尽管在此方案中的传感器没有使用光纤传感器,其测试精度没有方案二高,但也能满足测试的要求(具体的精度分析见后面的章节);④在此方案中的传感器与应变计相连后,再接到计算机上很容易实现自动测试;⑤整个测试系统的价格也比较便宜(大约只需二万元左右)。

通过对以上四个测试方案的比较和分析,我们得出其中方案四的性能价格比是最好的,并且完全能满足我们的测试要求,所以在岩溶地区桩基模拟试验中,我们选择了方案四作为本次试验的测试系统。

3.5 测试仪器的选择^[20, 34, 36, 42, 54, 57, 59, 60, 69]

3.5.1 传感器的选择

一. 传感器的工作原理

应变电测法中使用的传感器都是应变式传感器,它是量测物体受力变形产生应变的一种传感器。应变计是其最常用的传感元件,它是一种能将物体上应变的变化转化为电阻变化的传感元件。我们知道金属细丝的电阻 R 与丝的长度 L 成正比,而与其截面积 A 成反比,按物理学有下列公式:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (3-1)$$

式中 ρ 是金属的电阻率,当细丝受力而变形时,其电阻发生变化,此变化可由上式的微分求得:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} \quad (3-2)$$

细丝变形由泊松效应（ μ 为泊松比）引起截面变化： $\frac{dA}{A} = -2\mu \frac{dL}{L}$ ，代入上式有：

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\mu) \frac{dL}{L}$$

根据高压下金属细丝性能研究发现： $\frac{d\rho}{\rho} = m \frac{dV}{V}$

式中， V 为金属细丝的初始体积 $V=AL$ ， m 为比列系数，在一定应变范围内，对特定材料和加工方法， m 是常数。而 $\frac{dV}{V} = \frac{dA}{A} + \frac{dL}{L} = (1 - 2\mu) \frac{dL}{L}$ 得

$$\begin{aligned} \frac{dR}{R} &= [(1 + 2\mu) + m(1 - 2\mu)] \frac{dL}{L} = K\varepsilon \\ K &= [(1 + 2\mu) + m(1 - 2\mu)] \end{aligned} \quad (3-3)$$

在一定范围内 μ ， m 是常数，因此 K 也是常数，既电阻相对变化与应变成比例， K 称为金

属丝的灵敏系数， $\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon$ ，它表示应变—电阻效应，应变式传感器就是利用这一效应制成的。

二. 传感器的静态特性

静态特性是指传感器在被测物理量处于稳定状态时的输出输入关系。一般要求为线性关系，但实际传感器往往不完全符合这一要求。衡量传感器的静态特性的重要指标有线性度、滞后、重复性和灵敏度。

1. 线性度

通常为方便标定和数据处理，要求传感器输出—输入关系是线性的，但这只在理想情况下是完全直线的。传感器如果没有滞后和蠕变效应，输出—输入的静态特性可用下式表示：

$$Y = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + \dots + a_n X^n \quad (3-4)$$

式中， Y 为输出量， X 为输入量， a_0 为零位输出， a_1 为传感器灵敏度，常用 K 表示， a_2, a_3, \dots, a_n 为非线性项待定常数。

实际上非线性项次数不高，则可以用切线或割线代替 输出 Y
实际输出—输入曲线的某一段。

线性度（非线性误差）指在标准条件（环境温度为 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ ，相对湿度不大于 85%）下，传感器校准曲线与拟合直线间最大偏差与满量程（F.S）输出值的百分比，见图 3-9 所示。用 e_L 代表线性度，则有

$$e_L = \pm \frac{\Delta_{\max}}{Y_{F.S}} \times 100\% \quad (3-5)$$

式中 Δ_{\max} 为校准曲线与拟合直线间最大偏差， $Y_{F.S}$ 为传感器满量程输出平均值， $Y_{F.S} = Y_{\max} - Y_0$ 。

2. 滞后

传感器滞后表示传感器在正（输入量增大）反（输入量减小）行程间输出—输入曲线不重合

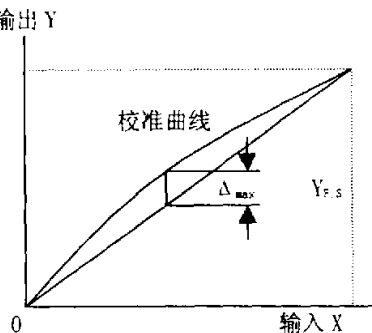


图 3-9 传感器的线性度

的程度，由图 3-10 表示。滞后反映了传感器机械部分存在缺陷，一般由实验检定，其值用满量程输出的百分比表示：

$$e_z = \frac{\Delta_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \text{ 或 } e_z = \pm \frac{\Delta_{\max}}{2Y_{FS}} \times 100\% \quad (3-6)$$

式中 Δ_{\max} 为输出值在正反行程间的最大差值。

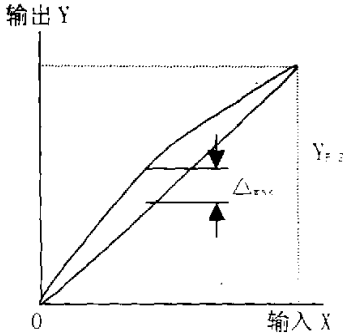


图 3-10 传感器滞后

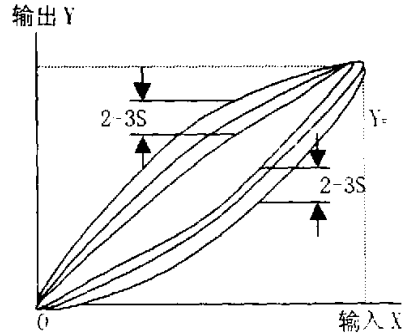


图 3-11 传感器重复性

3. 重复性

重复性是表示传感器在输入量按同一方向作全量程多次变动时所得特性曲线的不一致程度，由图 3-11 表示。重复性好，传感器误差小。通常用随机误差来描述数据离散程度，因此用标准偏差 S 表示重复性，S 用下式计算：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}{n-1}}$$

式中 Y_i 为输出测量值， \bar{Y} 为测量值的平均值， n 为测量次数。重复性用下式算出：

$$e_f = \pm \frac{(2 \sim 3)s}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (3-7)$$

S 前的系数取 2 时误差服从正态分布，置信概率为 95%；取 3 时，置信概率为 99.7%。

4. 灵敏度

线性传感器的校准线的斜率就是其静态灵敏度 K，计算公式为

$$K = \frac{\text{输出量变化}}{\text{输入量变化}} = \frac{Y}{X} = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \quad (3-8)$$

三. 传感器的选用

在建立在线、自动测试系统时，如何正确、合理地选用传感器往往是影响系统成败的关键。如同所有的检测系统一样，应根据其使用目的、测量准确度、环境条件、被测对象状况和输出信号要求等综合考虑，使所选传感器既能胜任工作、又不奢求过高性能，以取得最佳性能价格比。对自动测试系统，由于长期、连续地工作在生产现场，尤其应注意工作可靠性、长期稳定性、对特性的要求以及对环境的适应能力等。所以对于传感器的选择主要应注意以下四个方面：

1. 传感器精度的选择

传感器精度选择是从经济、实用及对传感器性能的侧重点来选择的, 首先应根据测试系统要求的精度, 合理地确定传感器的精度等级。不考虑系统实际要求, 一味追求高精度, 是既浪费资金、又无必要的。在测量精度要求低, 但工作状况恶劣的场合, 即对对传感器性能侧重于重复性、可靠性的场合就宜选用低精度、高可靠性的产品。相反, 在一些要求精度高的场合, 尤其在一个较长时间内无法进行调整周检的测量系统, 就不但要求线性、重复性、滞后三项指标, 而且还要考虑因温度变化引起的误差、蠕变误差及长期稳定性。

2. 传感器密封状态的选择

密封是传感器长期可靠稳定工作的保证, 大部分传感器都是因进水受潮导致损坏的。对于室内干净、干燥环境下工作的传感器, 可以选择涂胶密封的传感器, 而对于一些在潮湿环境下工作的传感器, 必须选择膜片热套密封或膜片焊接密封的传感器; 对于爆炸性条件下工作的传感器, 则必须选用防爆传感器; 对于在严重腐蚀性环境下工作的传感器, 则必须选择外表面进行喷塑或不锈钢外罩的传感器。

3. 传感器量程的选择

在测量仪表允许的条件下, 一般传感器选择量程为实际最大值的 2-2.5 倍。因为然后电子衡器均不可避免地存在着冲击、振动和偏载, 而由此可能产生的量值是难以估计的; 再则, 选择传感器量程时所选定的冲击数、重心偏移系数, 事实上也不是很确切的。所以从电子衡器最根本的性能指标一可靠性来考虑, 选用尽可能大的量程无疑是有利的。

4. 传感器技术参数的选择

在向厂家提出传感器订货时, 这些参数是必不可少的: 允许的不重复性、非线性误差、滞后误差, 这些参数应依据系统精度要求确定; 传感器输出灵敏系数及是否要求规范化; 桥路阻抗和激励电压; 复零特性、温飘特性、时飘特性、蠕变特性等等。对于一些精密测试场合, 在必要时用户可对自己选择的产品提出更详细的技术参数要求。

根据以上传感器的选用原则, 在桩基模拟试验的自动测试系统中选用了以下传感器:

1. WL-A 型电阻应变式轮辐荷重传感器

WL-A 型电阻应变式高精度荷重传感器, 是利用式 (3-3) 的应变—电阻效应, 采用轮辐型弹性梁作为敏感元件, 由轮圈、轮毂、轮辐条、应变计所组成。四根轮辐条成对连接在轮圈和轮毂之间, 八片应变计分别贴在四根轮辐条的正反面, 并组成全桥电路。当垂直力通过压头作用在轮毂上, 使轮辐条对角线缩短方向粘贴的应变计受压, 电阻值减小, 对角线拉长方向粘贴的应变计受拉, 电阻值增大, 致使电桥失去平衡, 在某一角输入桥压, 则在另一角检出同测力部成正比的电压讯号。

其主要技术性能指标有: 非线性误差 $\leq 0.025\%FS$; 滞后性误差 $\leq 0.035\%FS$; 重复性误差 $\leq 0.02\%FS$; 输出灵敏度 $\geq 2mV/V$; 量程: 0—5t; 零点温度漂移 $\leq 0.005\%FS/^\circ C$; 零点不平衡 $\leq 1\%FS$; 输出阻抗为 350 Ω , 允许工作电压 10—12V; 允许过载能力是额定荷载的 20%; 工作环境温度为 $-10^\circ C$ — $60^\circ C$ 。

WL-A 型电阻应变式轮辐荷重传感器, 是目前应用非常广泛的一种电阻应变式传感器, 其主要特点是: 具有良好的线性; 它可以经受大的偏心荷载和水平荷载, 并能消除误差; 刚度大、频率响应高; 能自动补偿由于温度变化造成的误差; 其高度比较低, 在尺寸上的适用性好。

2. HD-5 型位移传感器

YHD-5 型位移传感器, 主要由机械传动机构, 表面指示装置和电气线路等组成。基本工作原理是采用一般静、动态电阻应变仪常用的应变电桥原理, 当任何机械量转变为直线位移的变化量 ΔL , 推动机械传动机构, 使双触头在可变电阻上产生一个相应的 ΔR 的变化, 为了测试出 ΔR 的微小变化量, 由位移传感器中特制的双线密绕的无感电阻组成了外桥电阻, 组成为应变电桥, 从而实现了机械量转换成电量的目的, 这种机械量 (位移) 转换为电量的关系, 可由式 (3-3) 表示, 再根据 (3-1), 不难看出, 被测位移量的大小和 ΔR 以及 K 成正比。而与桥臂电阻成反比, 为此位移传感器只要进行适当的选择可变电阻丝 R 的直径、长度和电阻率, 以及桥路电阻就可以确定其灵敏度。

其主要技术性能指标有：量程为 0-5mm；校正系数为 0.001mm/ $\mu\epsilon$ ；桥路电阻为 14 Ω ；非线性 < 0.2%；示值变化 $\leq \pm 3\mu\epsilon$ ；工作环境温度 -35~+60℃；仪器灵敏系数 $K=2.00$ ；供电电压 < 10V；最大误差 $< \pm 5\mu\epsilon$ ；径向间隙为 $\pm 3\mu\epsilon$ ；工作环境的相对湿度 < 94%；其接桥方式是半桥。

根据其结构与工作原理，YHD-5 型位移传感器的主要特点是输出灵敏度高，线性好，体积小，自重轻，温度漂移小，抗湿性能强，安装使用方便，它是良好的位移传感器之一，特别是使位移的测量实现了电气遥控测量（有线传输），为实现位移自动化测试创造了必要的条件，从而对提高我国的测试技术水平、减轻位移测试的劳动强度、提高测量精度等方面提供了极大的方便。

(3) 双圆平板式土压力盒

双圆平板式土压力盒由上下两个圆平板组成，上圆平板为工作面，直接与土介质接触，而下圆平板作为弹性敏感元件。基本工作原理是采用一般的全桥差动电路，当土压力垂直作用于上圆平板时，力通过中间传力轴传到下圆平板，使对角线缩短方向粘贴的应变计受压，电阻值减小，对角线拉长方向粘贴的应变计受拉，电阻值增大，致使电桥失去平衡，在某一角输入桥压，则在另一角测出同测力部成正比的电压讯号。

其主要技术性能指标有：灵敏系数为 2.09；非线性 < $\pm 0.1\%FS$ ；输出灵敏度为 1mV/V；输出阻抗 350 Ω ；量程 > 1000 $\mu\epsilon$ ；绝缘电阻 > 500M Ω 。

双圆平板式土压力盒具有独特的结构形式，使传感器的灵敏度、载荷分布、刚度匹配等性能得到了改善，提高了测试精度。由于双圆平板式土压力盒采用了差动全桥接线，且结构对称性好，使得温度自补偿性能较好，同时，由于便于密封，使稳定性得到了提高。

3.5.2 测试原理

各种应变计和传感器通常需采用某种测量电路再接入测量仪表，测量其输出信号，对于电阻应变计及电阻应变式传感器，通常采用电桥测量电路，将应变引起电阻变化转化为电压或电流信号。电桥测量电路由电阻应变计及电阻组成桥臂，电桥的应变计按桥方式分单臂、半桥和全桥，电桥的电源可以是直流或交流，可以是恒压源或恒流源。在此测量系统中采用了恒压源的直流电压电桥，下面分析其特性：

电阻应变计及电阻接入电桥各臂，电桥由直流电压供源，电压输出桥示意图如图 3-12。四个桥臂电阻分别为 R_1, R_2, R_3, R_4 ，供电电压为 U ，电桥输出（B, D 间）为 ΔU_g ，一般常用全等臂电桥，即初始桥臂电阻 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ ，这时电桥处于平衡状态， $\Delta U_g = 0$ 。

对于半桥方式， R_1, R_2 为应变计， R_3, R_4 为平衡用固定电阻， R_1 为测量应变计， R_2 为温度补偿应变计，当测量应变计感受构件应变 ϵ 时，电阻 R_1 变成 $R_1 + \Delta R_1$ ，设温度补偿应变计 R_2 不变， R_3, R_4 也不变，则产生电压输出 ΔU_g ：

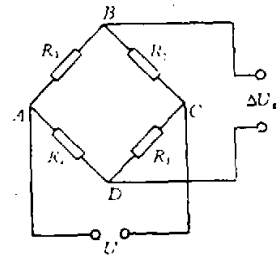


图 3-12 电压输出桥示意图

$$\begin{aligned} \Delta U_g &= \frac{(R_1 + \Delta R_1)R_3 - R_2R_4}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U \\ &= \frac{\Delta R_1}{4(R_1 + 1/2\Delta R_1)} U \end{aligned}$$

由于 $\Delta R_1 \ll R$ ，所以 $\Delta U_g \approx \frac{U \Delta R_1}{4 R_1} = \frac{U}{4} K \epsilon$ 。 (3-9)

对于全桥方式，当四个桥臂电阻都用应变计，且均发生应变而电阻变化时，即 $R_1 \rightarrow R_1 + \Delta R_1$ ， $R_2 \rightarrow R_2 - \Delta R_2$ ， $R_3 \rightarrow R_3 - \Delta R_3$ ， $R_4 \rightarrow R_4 + \Delta R_4$ ，则可得到下式：

$$\begin{aligned} \Delta U_g &= \frac{(R + \Delta R_1)(R + \Delta R_3) - (R + \Delta R_2)(R + \Delta R_4)}{(2R + \Delta R_1 + \Delta R_2)(2R + \Delta R_3 + \Delta R_4)} U \\ &\approx \frac{R(\Delta R_1 - \Delta R_2 + \Delta R_3 - \Delta R_4)}{4R^2 + 2R(\Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3 + \Delta R_4)} U \approx \frac{U}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \\ &\approx \frac{U}{4} K(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \end{aligned} \quad (3-10)$$

其中假设 $\Delta R_i/R_i$, $\Delta R_i/R_i$ 等较小, 分母中小量可以忽略, 电压输出与各桥臂的电阻变化 (或应变) 的代数和近似为线性关系, 且相邻桥臂的符号相反, 相对桥臂的符号相同。

3.5.3 测试仪器的选择

应变电测方法是利用应变-电阻效应制成的电阻应变计, 测量其电阻变化, 间接测试模型的应变。由于模型应变一般较小, 如用电桥直接测量应变计在应变前后的电阻值, 则至少需要六七位精密电桥, 而且测量极其不便。因此需采用某些测量电路, 将电阻相对变化 $\Delta R/R$ 的测量转化成电压或电流变化的测量, 如上节的电桥测量电路, 就把 $\Delta R/R$ 变成电桥的电压变化 ΔU , 再经放大等, 并组成专门的电阻应变测量仪器, 可方便和精确地直接测量和显示应变。

这种电阻应变测量仪器一般称为电阻应变仪, 它实质上是测量电阻变化, 但用应变刻度读数或显示。在桩基模拟试验中我们选用了由华东电子仪器厂生产的 YJ-22 型静态应变测量处理仪, 它是一种体积小、重量轻、便于携带, 适合于室内使用的应变仪。YJ-22 型静态应变测量处理仪通常采用电桥电路, 将电阻应变计和传感器接入电桥桥臂, 应变计和传感器感受模型的应变引起电阻变化, 电桥电路将电阻变化 $\Delta R/R$ 转换为电桥的电压变化, 经放大器放大后进行测量。其原理方块图如图 3-13 所示。

YJ-22 型静态应变测量处理仪的主要性能指标如下:

- (1) 量程: $0 \sim \pm 19999 \mu \varepsilon$;
- (2) 分辨率: $1 \mu \varepsilon$;
- (3) 基本误差限: 不大于 $\pm 2 \mu \varepsilon$;
- (4) 测量速度: 每秒 3 次 (有热电势补偿);
- (5) 电桥电压: $\pm 1.2V, DC$;
- (6) 初始记忆范围: $\pm 19999 \mu \varepsilon$;
- (7) 初始记忆容量: 机内 100 点;
- (8) 适用电阻应变计或传感器的电阻值: $60 \sim 1000 \Omega$;
- (9) 测量点数: 主机单独工作, 最多 100 点 (配 5 台 YZ-22 型转换箱), 连计算机工作, 最多 1000 点 (配 50 台 YZ-22 型转换箱);
- (10) 显示方式: 1 位符号, 5 位测量值;
- (11) 灵敏系数: K 固定 2.000 (可通过键盘修改, 范围 1.030—9.999);
- (12) 稳定性: 零点漂移不大于 $\pm 5 \mu \varepsilon / 4h$, 读数变化不大于 $\pm 1\% \pm 2 \mu \varepsilon / h$;
- (13) 温度变化影响: 温度对零点影响不大于 $\pm 3 \mu \varepsilon / ^\circ C$, 对读数影响不大于 $\pm 3 \mu \varepsilon / ^\circ C$;
- (14) 输出方式: 标准 CENTRONICS 接口, 可接 RX-80, FX-80 等带有标准接口的打印机;
- (15) 计算机控制接口: 8 位并行联络应答方式进行控制及信息交换, 每次命令可送十个测量通道组, 通道组测量区间 000-999 内任选, 可跳点、配 YJ-PC11 接口后可与带 RS232 接口的计算机联机工作;
- (16) 工作环境条件: 温度 $0^\circ C \sim +40^\circ C$, 相对湿度 30-85%。

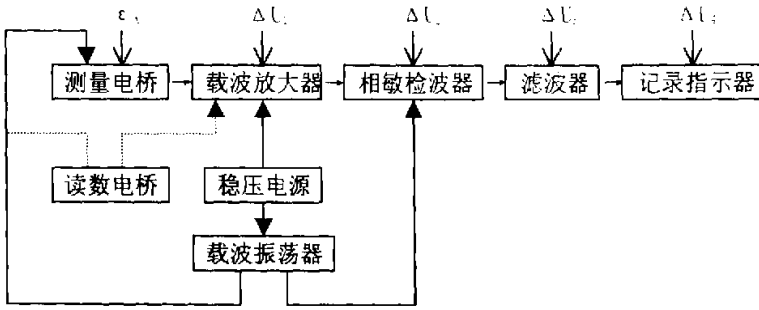


图 3-13 YJ-22 型静态应变测量处理仪原理方块图

3.6 自动测试系统的组建^[74, 92, 93]

自动测试系统内的各测试元件、测试仪器和计算机，是通过标准的 GPIB 无源母线电缆互相联接起来而形成一个系统的。具体的联接，可采取任何形式，如链形、星形、或二者的混合形式。

在星形联接中，各器件间的母线电缆长度较短，适用于快速数据传输。链形联接则可以链接到距离较远处的器件，只要电缆总长度不超过 20 米或 2 米×器件数目（二者中取其小者）即可。当电缆较长时，显然不利于快速数据传输，因此应该每隔 1 至 2 米接上一个等效负载，以适当增大接口驱动器的输出电流来提高信噪比，以避免因长线效应而产生的驻波的波节处信号过弱。一般，在必要时，常利用手头现有的、但系统上并不使用的器件的 GPIB 接口来作为长电缆中间的假负载。

在桩基模拟试验中，为了使其数据能快速传输和减小系统误差，其自动测试系统采用了星形联接方式。自动测试系统的组成如图 3-14 所示。

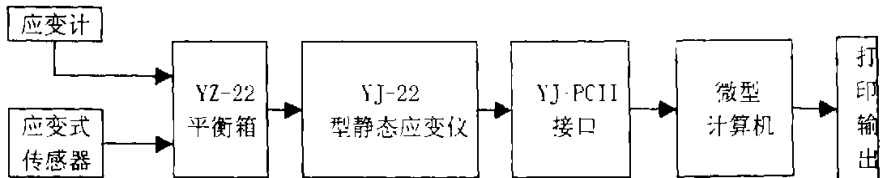


图 3-14 自动测试系统组成框图

第四章 自动测试系统设计

4.1 测试仪器结构分析^[29, 78, 79, 80, 81, 82]

根据上章的自动测试系统的组成,我们选用的量测仪器是 YJ-22 型静态应变测量处理仪。它是一种带有 8039 单片微处理机的应变仪,配合 YZ-22 型转换箱可以进行自动测量。它具有测量热电势自动补偿的功能,具有单片桥路非线性修正及自动调零功能,因此预热时间短,测量精度高,稳定性好。YJ-22 型静态应变测量处理仪具有自诊断功能,能判断仪器故障所在。YJ-22 型静态应变测量处理仪能与任何带标准 CENTRONICS 接口的打印机相连,如配用 YJ-AP I 或 YJ-AP II 智能接口,可方便地与计算机相连,完成复杂的测量与数据处理任务。其电源框图如图 4-1 所示。

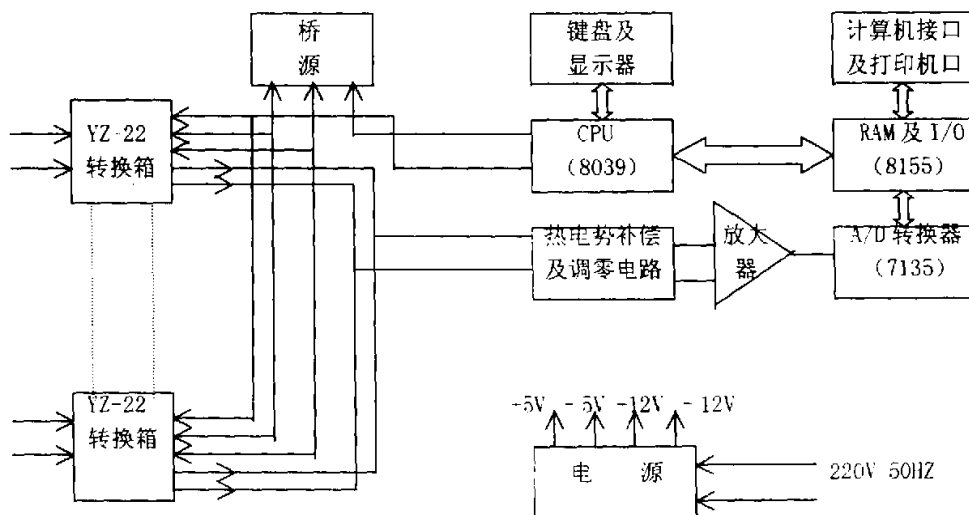


图 4-1 YJ-22 型静态应变测量处理仪电源框图

单片机是现代自动化测控仪器仪表的核心部件,用单片机组成的仪器仪表不但可以用软件实现传统仪器仪表中许多硬件测量电路的功能,而且还可以用软件对测试结果进行进一步的整理、运算、加工或推演,获得传统仪器难于测量或根本无法测量到的数据和深层结果。从这个意义上,人们将用微处理器或单片机构成的仪器统称为“智能仪器”。

根据图 4-1, YJ-22 型静态应变测量处理仪所选用的 CPU 芯片是 Intel 公司生产的 MCS-48 系列中的 8039。8039 芯片具有以下的基本性能:①内部具有一个 8 位的 CPU 和单一内部总线;②有 27 根 I/O 口线,其中有两个 8 位并行 I/O 准双向口;③有一个 8 位的定时/计数器;④单级中断系统,两个中断源;⑤有内部时钟电路,外接 4-11MHz 晶振;⑥单一+5V 电源。

4.1.1 单片机的端口特性

8039 单片机为双列直插式封装，有 40 条引脚线，其逻辑符号如图 4-2 所示，引脚排列如图 4-3 所示。一般情况下，每个逻辑电平与 TTL 兼容，每个输出脚能驱动一个标准的 TTL 负载。

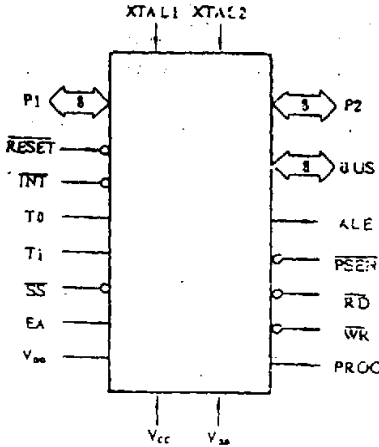


图 4-2 8039 单片机逻辑符号

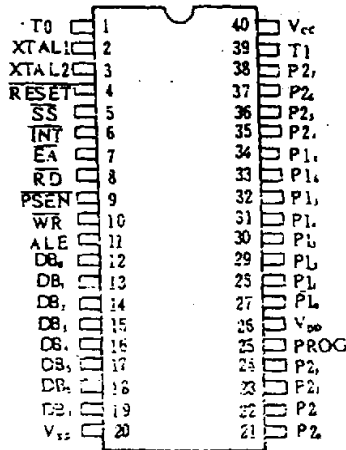


图 4-3 8039 单片机引脚排列图

下面分别说明各条引线的功能。

一. 电源线

单一的-5V 电源供电，有三条电源线：

V_{SS} —地电源 (GND)。

V_{TT} —接备用电源，当主电源掉电时，备用电源能保证内部 RAM 的内容不丢失。

V_{CC} —主电源-5V。

二. 晶体振荡输入线

XTAL1—内部晶体振荡器的外接晶体输入端，亦是外部振荡源的输入端。

XTAL2—外接晶体的另一个输入端。

三. 通用输入/输出口线

有三个 8 位并行输入/输出口：

$P1_0 \sim P1_7$ —8 位准双向端口 (P1 口)。

$P2_0 \sim P2_7$ —8 位准双向端口 (P2 口)。

$DB_0 \sim DB_7$ —8 位三态双向总线口 (又称 P0 口或 BUS 口)。

四. 控制线

(一). 输出线

控制线输出线共有 5 条，主要控制外接存储器或扩展器与单片机同步工作。

ALE—地址锁存使能信号，在 ALE 的下降沿，锁存 BUS 上的地址码。

\overline{PSEN} —外部程序存储器选通使能信号， $\overline{PSEN}=0$ 时，此信号有效。

\overline{RD} —读控制信号， $\overline{RD}=0$ 时，输出的读选通信号有效。

\overline{WR} —写控制信号， $\overline{WR}=0$ 时，输出写选通脉冲有效。

PROG—编程选通信号。

(二) 输入线

控制输入线共 6 条，用于控制测试、中断、单步等功能。

T0—功能有二：

- (1) 测试输入端：它的输入逻辑电平值可用条件转移指令 JTO 和 JNTO 进行测试。
- (2) 时钟输出端：在 ENT0 CLK 指令控制下，T0 端可作为时钟输出端，系统总清时，此功能被禁止。

T1—功能有二：

- (1) 测试输入端：它的输入逻辑电平值可用条件转移指令 JT1 和 JN1 进行测试。
- (2) 事件计数器的输入端：在 STRT CNT 指令作用下，可作为事件计数器的输入口。

EA—外部存取控制输入线。

\overline{INT} —中断请求线。

\overline{REST} —复位信号输入线。

\overline{SS} —单步控制输入线。

4.1.2 程序存贮器的扩展

程序存贮器是专门用来存放程序（即指令）的存贮部件。在取指操作时，CPU 首先要给程序存贮器输出地址信号，寻址到相应的存贮单元，然后发出取指控制信号。在取指控制信号的控制下，程序存贮器把被寻址单元中的内容（指令）送到数据线上，通过数据线把指令送入 CPU。因此，CPU 与程序存贮器之间的连接包括 3 个部分：地址线、数据线及控制线。由于 8039 没有内部程序存贮器，即使构成一个最小的系统，也是需要外接存贮的，必须在外部程序存贮器中取指，故它的 EA 端必须接 -5V。

YJ-22 型静态应变测量处理仪中的 8039 使用一片 2732 (4K×8EPROM) 来实现 4K×8 的程序存贮器的控制。2732EPROM 存贮器容量为 4K 字节，有 12 位地址线，它的封装引脚及功能表如图 4-4 所示。除了 $A_{11} \sim A_0$ 12 个地址线引脚、 $D_7 \sim D_0$ 8 个数据线引脚外，还有： \overline{CE} （器件的片选信号输入端）； \overline{OE}/V_{pp} （读信号和编程信号输入端）。当器件工作于只读状态时， \overline{OE}/V_{pp} 端输入低电位，片内指定单元的内容被选输出到数据总线上；在对芯片进行编程时，该端要加一个幅度为 21V、宽度为 10ms 左右的编程脉冲信号，数据线上的数据才会被固化到指定的单元中去，之后，除非用紫外光照射，该单元的内容将永久保存。

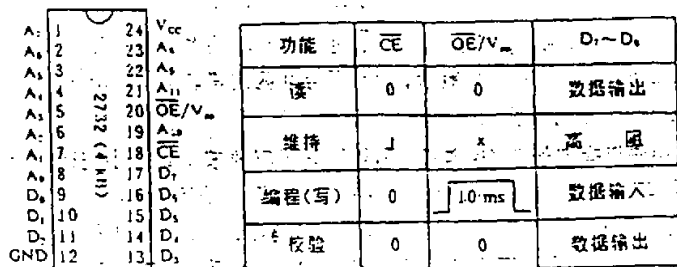


图 4-4 2732 封装及引脚功能

图 4-5 表示 8039 单片机与 EPROM2732 的连接图。由于 EPROM2732 是 4K 的程序存储器，其寻址范围有 12 条地址线，所以要把 8039 单片机的 P2_{0~7} 引脚接到 2732 的 A_{0~7} 上。PC_{0~7} (P2 引脚的地址信号) 与 PC_{8~11} 位是完全隔离的。PC_{8~11} 位为计数器，而 PC₁₂ 不参与计数，是一个受软件控制的触发器，称为体选位。当执行 SEL MB₀ 时，PC₁₂=0 (体选触发器 DBF=0)，单片机访问 2732 的 000H~7FFH 的 2K 地址范围。执行 SEL MB₁ 时，PC₁₂=1 (体选触发器 DBF=1)，单片机访问 2732 的 800H~FFFH 的 2K 地址范围。所以当使用 4K 容量内存时，必须注意体选指令的配合。当然开机复位后，首先选的是体 0 程序存储器 (此时 DBF 清 0)。

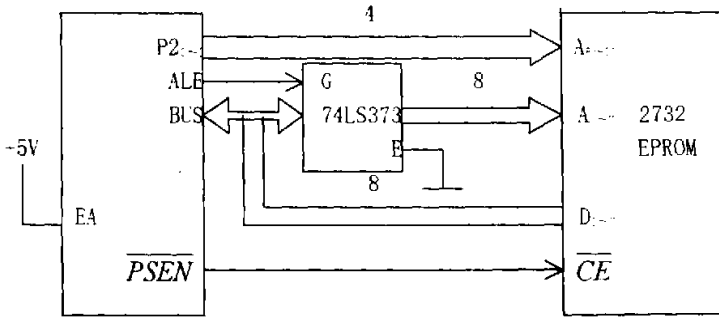


图 4-5 8039 外扩 4K×8 (使用一片 2732EPROM) 的程序存储器连接图

4.1.3 I/O 的扩展

MCS-48 系列单片机与 MCS-80/85 系列通用微处理器的总线结构相同，因此标准的 MCS-80/85 外围接口芯片也可作为单片机的 I/O 扩展芯片。这些接口片通常是从单片机的 BUS 上进行扩展，即利用 BUS 作为地址/数据复用总线，用 MCS-48 的 \overline{RD} 和 \overline{WR} 作为读写控制线。当执行 MOVX 指令时，实现输入/输出操作。

YJ-22 型静态应变测量处理仪中的 8039 使用一片 8155 芯片来进行 I/O 的扩展。8155 是一种 40 脚封装的可编程接口器件，片内包含有 256×8 的静态 RAM，两个 8 位 I/O 口 (PA 和 PB)，一个 6 位 I/O 口 (PC) 和一个 14 位的定时器/计数器。它的封装形式和操作原理框图如图 4-6 所示，图中

- . AD_{0~7} 8 位时分地址/数据总线，可与单片机的 AD_{0~7} 直接相连。
- . \overline{CE} 片选信号输入线。
- . \overline{RD} 、 \overline{WR} 读写线。
- . IO/M I/O 操作或 RAM 操作选择控制线。
- . ALE 地址锁存信号输入线，它可将单片机 AD_{0~7} 上的地址信息和 \overline{CE} 、IO/M 状态信息锁存到 8155 片内寄存器中。

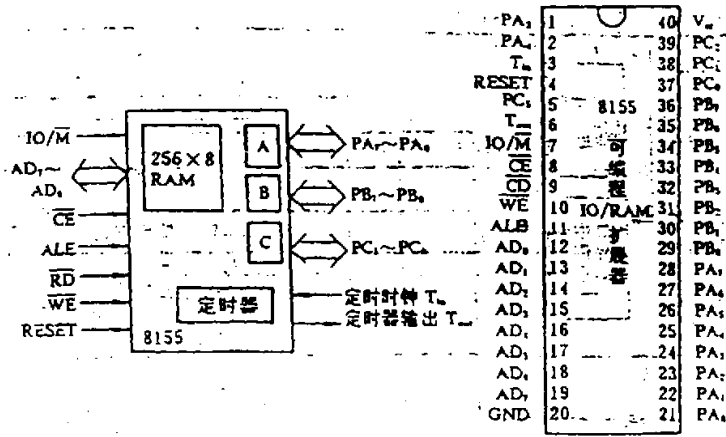


图 4-6 8155 引脚与原理框图

YJ-22 型静态应变测量处理仪中的 8039 与 8155 的连接如图 4-7 所示，由于 8155 内部带有一个锁存器，所以不需外加地址锁存器。在图 4-7 中，P2₄与 IO/M 相连。当 P2₄=0 时，使用 MOVX 指令可读/写 8155 内部的 256×8 RAM，地址由 8039 的 R₀ 或 R₁ 提供；当 P2₄=1 时，使用 MOVX 指令可执行 I/O 或定时器操作，可寻址的六个寄存器地址由 8039 的 R₀ 或 R₁ 提供。

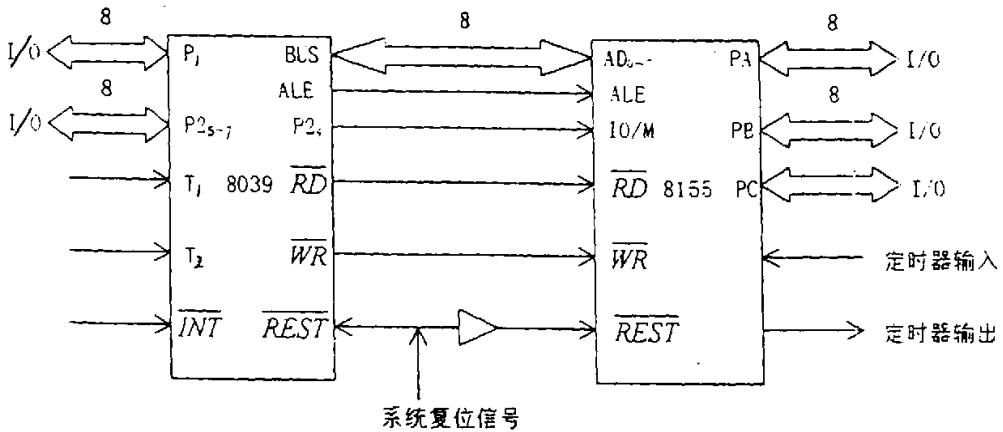


图 4-7 8039 的 I/O 扩展 (使用一片 8155)

4.1.4 外围设备的扩展

一. 键盘与单片机的接口电路

键盘是计算机系统最常用的、廉价的输入设备，用户通过键盘向计算机输入数据或命令。键盘是由若干按键组成的开关矩阵。键是一种常开型按钮开关，平时（常态）键的二个触点处于断开状态，按下键时它们才闭合（短路），为了节省口线，键盘中的键以矩阵形式排列在各条行线与列线的交点上，键的两个接点分别接在该键所在位置的行线与列线上。当没有键闭合时，所有的行线都为高电平，当有某一键闭合时，则该键所对应的行线与列线短路，该行线的电平取决于

与它短路的列线电平。单片机对键盘的控制是采用扫描方法。把列线接到单片机的输出口，行线接到单片机的输入口。单片机通过输出口依次向各条列线发出低电平扫描信号，并同时通过输入口对各行线的电平进行测试。

YJ-22 型静态应变测量处理仪的键盘有四个命令键，分别是：手动键（常用于单点测量）、调零键、自动键和本机键（用于在线测量）。其 8039 芯片与键盘的接口如图 4-8 所示，为了提高单片机的工作效率，应用了随机中断扫描方式，键盘的行线接到 P1 口的低四位（测试输入口），列线通过二极管接到 P1₄ 口（扫描输出口）初始化后，P1₄ 输出为“0”，没有键闭合时， \overline{INT} 为高电平，当有任何一个键闭合时， \overline{INT} 变低，向单片机发出中断请求，单片机响应中断，执行中断服务程序，扫描键盘。

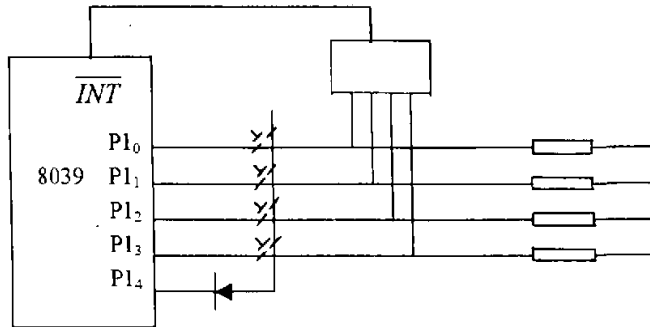


图 4-8 8039 单片机与 1×4 键盘的接口

二. LED 显示器与单片机的接口电路

LED 显示器是由发光二极管组成的数码显示器件，由于它的工作电压低（与计算机芯片的电源电压兼容），显示清晰、寿命长、响应速度快，所以被广泛地应用在微机系统中，显示数码、字母和字符。LED 显示器有分段式和矩阵式两种。由于分段式驱动方法简单，故应用最广泛。分段式中常用七段式，它由七个长条型（七段）发光二极管排列成日字形图案。控制某些段发光，便能显示 0~9 十个数码和一些简单的字母、字符。此外，每个显示器还附加一个圆点形发光二极管 T_p 作小数点使用。

YJ-22 型静态应变测量处理仪的显示器是采用动态显示方式，各显示器的段控制端共用一个输出口，同时单片机输出的位选择脉冲接到各 LED 显示器的位控制端，控制各位的 LED 显示器依次点亮。如图 4-9 所示，字形口用 P1 口，P1 口输出的字形码经反相器 74LS04（缓冲）后送给用分立元件组成的驱动器，经驱动器输出的字形码并行的接到每一位 LED 显示器的阳极上，但到底应在哪一个 LED 数码管上显示，由其公共阴极的电位决定。字位由 P2₄ 管理，字位的扫描信号从 BUS 口的 DB₄~DB₀ 输出，经锁存器 74LS373，送给字位驱动器，最后加到各个共阴极上。动态扫描显示的特点是逐位亮灭、循环往复，适当调整延时间隔，利用人眼的惰性，使之产生连续显示的感觉。

三. A/D 转换器与单片机的接口

外界的检测和控制对象大多数为连续变化的模拟量（模拟信号），而微型计算机本身是一个数字系统，它只能传输、存贮、变换、控制、处理数字量（数字信号）。因此，常需使用 A/D 转换器（ADC），把外界的模拟量转变位数字量后，计算机才能进行加工、处理。

YJ-22 型静态应变测量处理仪选用了 ICL7135A/D 转换器，ICL7135 是一种 4 位半双积分型单片集成 ADC 芯片。其分辨率相当于 14 位二进制数；转换精度高，转换误差为 ±1LSB；并且能在单极性参考电压下，对双极性的输入模拟电压进行 A/D 转换；模拟输入电压范围为 0~±

1.9999V。芯片采用了自动校零技术，可保证零点在常温下的长期稳定；模拟输入可以是差动信号，输入阻抗极高。ICL7135 转换结果输出是动态的，因此必须通过并行接口才能与单片机连接。图 4-10 所示为 ICL7135 与单片机 8039 的接口电路。图中 74LS157 为 4 位 2 选 1 的数据多路开关，74LS157 的 SEL 输入为低电平时，1A、2A、3A 输入信息在 1Y、2Y、3Y 输出；SEL 为高电平时，1B、2B、3B 输入信息在 1Y、2Y、3Y 输出。因此，当 7135 的高位选通信号 D_5 输出为高电平时，万位数据 B_1 和极性、过量程、欠量程标志输入到 8155 的 $PA_0 \sim PA_3$ ，当 D_5 为低电平时，7135 的 B_8 、 B_4 、 B_2 、 B_1 输出低位的 BCD 码，此时 BCD 码数据线 B_8 、 B_4 、 B_2 、 B_1 输入到 8155 的 $PA_3 \sim PA_0$ 。

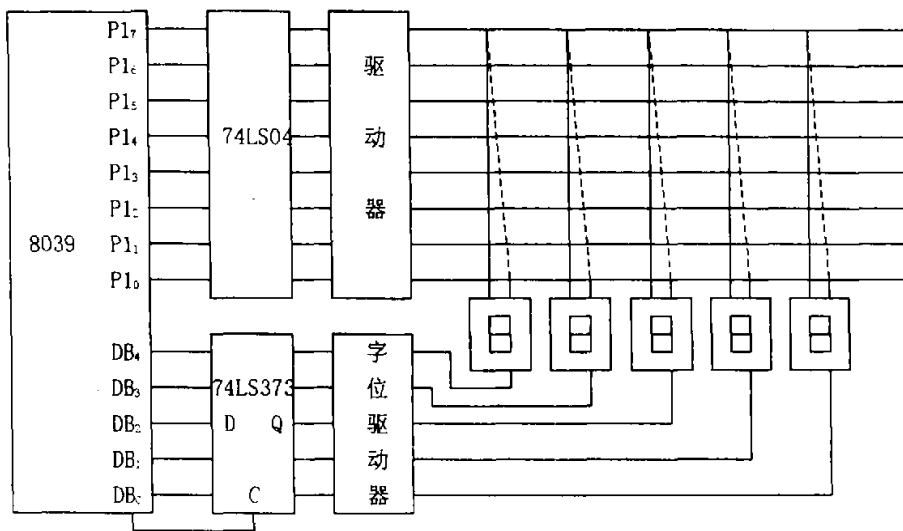


图 4-9 8039 单片机与五位 LED 显示器的连接

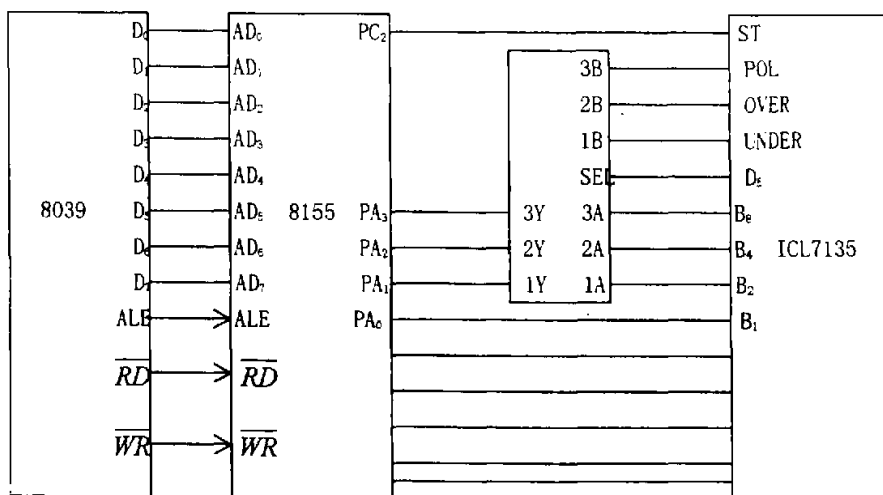


图 4-10 8039 单片机与 ICL7135 的接口电路

4.2 测试系统精度分析^[32, 35, 40, 46, 47, 48, 51, 59]

4.2.1 测试系统误差的来源与分类

正确认识误差以及确定误差所分布的大小范围对于准确地解释和利用测试结果是十分重要的。对于误差认识的不足,有可能导致对测试结果的错误的解释,因而影响到实际生产过程或进一步的科学研究。测试过程中的误差有多种来源,既有来自仪器性能自身的,又有来自测试环境的,还有来自人为操作的。这些误差源可以统归于如下三类:

- ① 仪器自身特性引起的误差;
- ② 环境变化引起的误差;
- ③ 认为操作不当引起的误差;

一. 仪器自身引起的误差

测试仪器本身的性能不稳定是误差的主要来源之一。由于仪器元件自身或仪器的工作原理并不是十分完美的,所以就有可能存在:

(1)元件性能或结构的误差。无论是机械或电子元件,在加工中总是给予适当的公差,由此导致仪器本身特性也只能保证在一定的范围内稳定。这些元件自身的误差形成了误差源之一。

(2)非线性误差。非线性误差常来源于元件本身的非线性以及机械结构本身的滞回死区与摩擦特性。

(3)零点与灵敏度漂移。仪器的零点及灵敏度将有可能随着温度及工作时间而变化。

(4)量程与分辨率误差。由于元件特性的不理想,测试系统的量程与分辨率将有可能偏离设计时的理想值。

(5)标定误差。由于缺乏十分完美的条件与环境,无论如何精心地对系统进行标定,标定误差总是难免的。然而通过细致的标定,总能使标定误差控制在满足测试要求的一定范围内。

二. 环境变化引起的误差

环境变化是误差源的另一重大要素。由于桩基模拟试验进行的时间较长,其环境的变化对于测试结果的影响就不能忽视。在桩基模拟试验中几种主要的环境影响因素为:

(1)温度。几乎在任何讨论环境影响因素时,温度都首当其冲地被列在了第一位。温度的变化对于测试结果的影响是十分显著的。温度不但影响测试系统本身的性能,而且还影响到被测信号。一般来说,温度效应体现在相对测试时间上,短时间内对单个试件进行测试,温度效应是不显著的,而在长时间内进行测试时将不可忽视。

(2)相对湿度。相对湿度的变化主要体现在大环境中,而温度的变化既存在于大环境,又可能存在于局部或小环境。因此相对湿度的影响不如温度那么显著。

(3)振动与噪声。干扰振动与噪声可能来自于地基,也可能来自于测试系统本身的振动与噪声。

(4)电磁干扰。当测试系统在很强的电磁干扰环境中工作时,外界强电、磁场有可能改变测试系统的特性,因而影响到测试误差。

三. 人为操作不当引起的误差

上面所述的误差源往往是客观存在的,难以彻底消除,但有可能尽量地减少。人为操作不当引起的误差是由主观因素造成的,它既可能是主要的误差源,又可能是最次要的误差源;既可能在某种程度上减小,也可能完全避免。下面是几种主要的人为操作不当现象:

(1)量程选择不当。在测试前,对于被测信号的范围应有一个大致的估计,以便选择适当的传感器以及仪器的量程。如果被测信号的范围、传感器的量程、仪器的量程三者不协调则将导致测试结果失真。

(2)灵敏度选择不当。这将造成两种后果:当灵敏度太小时,测试系统缺乏足够的分辨率及灵

敏度,因而导致对被测信号反应不灵敏及大的量化误差;另一方面,当灵敏度太大时,往往造成仪器的测试范围不够,因而使测试结果为消波信号。

(3)传感器与仪器的阻抗不匹配。这也称之为负载误差。在理论上往往要求串接的部件有较佳阻抗匹配,即要求传感器与放大和分析系统有合适的输出与输入阻抗匹配,通常传感器要求有较小的输出阻抗,而放大和分析部分有较大的输入阻抗。

(4)测试系统接地不当。在理想的情况下,测试系统的所有接地点以及大地之间应具有零电位。然而,实际上在不同的接地点之间具有共模电压源,在相邻接地点之间形成了接地回路。因此测试系统最好设立一个独立于动力“地”的专门的地线。

(5)测试系统预热不够。在不同的温度条件下,电子元件的工作特性往往是不同的。因此当系统未充分预热时即进行测试,则可能会引起测试误差。

四. 系统误差与随机误差

以上是对误差来源的分类。如果从误差的性质和表现形式来看,误差又可分为系统误差与随机误差。

系统误差主要是指一种固定的、其量值可以预计或估算的误差。它主要来自于仪器特性偏离于理想状态,测试环境的影响,测试程序,标准及某些人为操纵因素的影响等。如前面所述的非线性、滞回特性、零点漂移、温度影响等都属于系统误差。理论上来说,系统误差可以量化或曰确定性函数来描述。在实际测试过程中,系统误差总是不可避免地存在,但可以在一定程度上通过误差补偿来减小。

随机误差主要是指非固定的、不可预计其量值大小的误差。随机误差主要来源于无法估计的随机因素对于测试系统的影响。如仪器的随机噪声、人为操作的随机性等。理论上单个随机误差不能量化也不能由确定性函数来描述。在测试过程中随机误差总是难免的,但与系统误差比较更易由统计的方法处理。

关于系统误差与随机误差的处理方法将在以下两节中。

4.2.2 系统误差的处理

由于系统误差主要反映了测试系统的准确度,属于确定性的、重复性的误差,所以它可以通过标定的方式来估计其大小。在标定中如已知被测量的准确值为 A , 测试结果为 x , 它包括了系统误差和随机误差。第 i 次测试结果为:

$$x_i = A + \Delta x_i + \delta x_i \quad (4-1)$$

式中: Δx_i 为第 i 次测试时的系统误差; δx_i 为第 i 次测试时的随机误差。当对被测试进行重复 N 次测试后,对测试结果求均值有:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (A + \Delta x_i + \delta x_i) \quad (4-2)$$

由于对于系统误差有 $\Delta x_1 = \Delta x_2 = \dots = \Delta x_N = \Delta x$, 而对于随机误差有 $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta x_i = 0$

则系统误差可通过求 N 次测试的均值解得为 $\Delta x = \bar{x} - A$ (4-3)

任何测试系统的误差通常都取决于系统中每一个元件的非理想性质—例如非线性度、环境的统计的影响等。从桩基桩基模拟试验自动测试系统的组成来看,它是由应变式传感器(或应变计)、平衡箱和应变仪等组成。根据第三章的分析应变式传感器是根据应变计的原理制成的,从而我们在分析量测系统的误差时,必须考虑下列各因素的影响,并对其进行修正。

一. 应变计的影响及其修正

1. 应变计栅长的影响

应变计是以其栅长范围内的平均应变来表示这一长度内某点的应变，其误差由栅长大小和其中应变梯度决定。设应变计栅长 L 范围内应变分布规律可用多项式表示：

$$\varepsilon_x = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots \quad (4-4)$$

当 a_1, a_2, \dots 为零时， ε_x 是均匀应变， a_2, a_3, \dots 为零时 ε_x 为线性变化。如用栅长 L 内平均应变代表栅长中点 M 的应变，则只有在均匀应变和线性变化应变时才是正确的。对于按二次函数变化的应变，平均应变 ε_a 为：

$$\varepsilon_a = \int_0^L \varepsilon_x dx / L = a_0 + a_1 \frac{L}{2} + a_2 \frac{L^2}{3} \quad (4-5)$$

$$\text{而中点 } M \text{ 的应变为 } \varepsilon_M = a_0 + \frac{a_1 L}{2} + \frac{a_2 L^2}{4} \quad (4-6)$$

$$\text{两者之差 } \delta_\varepsilon \text{ 为： } \delta_\varepsilon = \varepsilon_a - \varepsilon_M = \frac{a_2 L^2}{12} \quad (4-7)$$

误差大小与栅长 L 和系数 a_2 有关，对于按三次或更高次规律分布的应变，误差更大。因此对于应力集中区应选用栅长很小的应变计，目前国内外应变计栅长最小为 0.2mm，对于应力集中区已足够了。但是在误差允许的条件下应选择栅长较大的应变计，因为粘贴时方向易于准确。

2. 应变计横向效应的修正

对于正确地选择和安装，并已进行正常的温度补偿的应变计基本上消除了由于安装方向补准以及热输出等因素的影响。形成测试误差的主要原因是应变计灵敏系数的分散、机械滞后、零漂等其他工作特性，这些都属于系统误差是可以进行修正的，一般来说应变计的横向效应是影响这些特性的主要原因，下面分析应变计横向效应的修正。

设在平面应力状态下，在主应力方向分别有两枚应变计测量主应变 ε_1 和 ε_2 ，由于应变计存在横向效应，测出两个应变读数 ε_{1tx} 和 ε_{2tx} ，由应变电阻效应有下列公式：

$$\varepsilon_{1tx} = \frac{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_1}{K} = \frac{1}{K} (K_x \varepsilon_1 + K_y \varepsilon_2) = \frac{K_x}{K} (\varepsilon_1 + H \varepsilon_2) \quad (4-8)$$

$$\varepsilon_{2tx} = \frac{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_2}{K} = \frac{K_x}{K} (\varepsilon_2 + H \varepsilon_1) \quad (4-9)$$

式中 K 为应变计灵敏系数，在单向应力状态下，有 $\varepsilon_2 = -\mu_0 \varepsilon_1$ ，所以 $K = K_x (1 - \mu_0 H)$ ，将它代入式 (4-8)，(4-9) 得

$$\varepsilon_{1tx} = \frac{1}{1 - \mu_0 H} (\varepsilon_1 + H \varepsilon_2)$$

$$\varepsilon_{2tx} = \frac{1}{1 - \mu_0 H} (\varepsilon_2 + H \varepsilon_1)$$

由上两式解出实际应变 ε_1 和 ε_2 ，同时由于 $H^2 \ll 1$ ，所以 H^2 与 1 相比可忽略，得出：

$$\varepsilon_1 = (1 - \mu_0 H) (\varepsilon_{1\text{仪}} - H \varepsilon_{2\text{仪}}) \quad (4-10)$$

$$\varepsilon_2 = (1 - \mu_0 H) (\varepsilon_{2\text{仪}} - H \varepsilon_{1\text{仪}}) \quad (4-11)$$

上两式即为应变读数考虑应变计横向效应的修正公式。

二. 导线的影响及其修正

一般导线电阻的影响可以用下列方法进行修正。设应变计用两根导线连接到应变仪，电阻为 R_L ，则由应变电测原理： $\frac{\Delta R}{R + R_L} = K \varepsilon_{\text{仪}}$ ，实际应变 ε 与应变计本身电阻相对变化之间的关系

为： $\frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon$ 。由于导线电阻影响，所测得的应变值与实际应变值之间产生一系统误差将上两式相除可得：

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{仪}} \left(1 + \frac{R_L}{R} \right) \quad (4-12)$$

这说明，导线电阻的存在使应变测量值偏小，必须按照不同的桥路法进行修正。

在单臂测量时，如果每个电阻应变计用两根长导线与应变仪连接，其桥臂电阻为： $R + R_L = R + 2r$ ，式中的 r 为一根导线的电阻值，则修正公式可写成：

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{仪}} \left(1 + \frac{2r}{R} \right) \quad (4-13)$$

若每个应变计只用一根长导线与应变仪连接，把它们的另一端与平衡电阻就近连在一起，再用一根公共长导线与仪器连接，工作臂的电阻值为 $R + r$ ，则修正公式为：

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{仪}} \left(1 + \frac{r}{R} \right) \quad (4-14)$$

对于半桥测量电路，如采用公共导线方式，修正计算的方法也按公式 (4-14)。对全桥测量电路，由于导线电阻不影响任何桥臂电阻，不必对应变测量读数进行修正，只需考虑它们对桥路电源或放大器输入阻抗的影响。

导线间的分布电容，只有在使用交流供桥的应变仪时才考虑其影响。在半桥连接时，如相邻桥臂导线分布电容分别为 C_1 和 C_2 ，只有在桥臂电阻和分布电容都相等的条件下电桥才能平衡。分布电容的存在会影响电桥灵敏度，一般由此引起的测试误差可写成

$$e_c = \omega^2 C^2 R^2 \times 100\% \quad (4-15)$$

式中 ω 为电桥交流电源的圆频率， R 为桥臂电阻， $C = \frac{C_1 + C_2}{2}$ 。若桥路电源的频率不太高（如静态应变仪等），并且桥臂电阻不太大时，分布电容的影响往往可以忽略。

三. 应变仪

静态应变测量仪器主要的工作特性是基本误差和稳定性，一般国产静态应变仪基本误差为 $\pm 0.1\% \sim \pm 1\%$ ，稳定性为 4 小时内零漂 $(1 \sim 5) \mu\text{m/m}$ 。国外静态电阻应变仪或数字式应变测量系统一般基本误差为 $0.05\% \sim 0.1\%$ ，但稳定性一般为 $(1 \sim 2) \mu\text{m/m}$ 。根据应变仪的基本误差，可

以确定它的综合精度，测量前应检测应变仪的基本误差和稳定性。为了消除操作者或仪器出现的偶然性“读数误差”，通常在静态应变测量时要求重复加载测量 2~3 次，取平均读数。

四. 系统误差的合成

1. 系统误差的扩展 在大多数情况下，测试系统由多个子系统或部件构成的，每个子系统的系统误差将扩展影响到整个系统的测试误差。设系统的输出与输入的关系为：

$$y = f(x, u_1, u_2, \dots, u_m) \quad (4-16)$$

式中， y 为系统输出量； x 为系统输入量； u_1, u_2, \dots, u_m 为系统各环节有关参量。

当系统输入量不变，即 $\Delta x=0$ 时，由于系统各环节参量的变化为 $\Delta u_1, \Delta u_2, \dots, \Delta u_m$ ，使系统输出量或者说造成误差 Δy ，并且有：

$$y + \Delta y = f(x, u_1 + \Delta u_1, u_2 + \Delta u_2, \dots, u_m + \Delta u_m) \quad (4-17)$$

将上式以台劳级数展开并忽略二阶以上的微小量，可得：

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial u_1} \Delta u_1 + \frac{\partial f}{\partial u_2} \Delta u_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial u_m} \Delta u_m \quad (4-18)$$

系统输出量的相对误差为：

$$\frac{\Delta y}{y} = \frac{\partial f}{\partial u_1} \frac{\Delta u_1}{y} + \frac{\partial f}{\partial u_2} \frac{\Delta u_2}{y} + \dots + \frac{\partial f}{\partial u_m} \frac{\Delta u_m}{y} \quad (4-19)$$

2. 恒定系统误差的合成 当测试系统有几个环节或部件相互产生恒定系统误差，其大小和符号已知，总的合成误差可按代数计算：

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_m = \sum_{i=1}^m \varepsilon_i \quad (4-20)$$

式中， $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m$ 为各环节的恒定系统误差； ε 为合成后的系统误差。

当误差的项数较多时，一般情况下合成误差可用下式计算：

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \dots + \varepsilon_m^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \varepsilon_i^2} \quad (4-21)$$

4.2.3 随机误差的处理

随机误差是一种不确定的误差。即使在重复测试情况下，每一次的随机误差值都是不可预估的，并且并不是重复的。尽管单次测试的随机误差难以估计，但随机误差却可在统计上量化，并且相对系统误差来说，随机误差更易于从测试结果中剔除。

由式 (4-1) 及 (4-3) 可知，每次测试结果的随机误差为：

$$\delta x_i = x_i - \bar{x} \quad (4-22)$$

下面分析各物理量随机误差的传递或综合的方法，设 $y = f(x_1, x_2, \dots, x_r)$ 表示

x_1, x_2, \dots, x_r 共 r 个直接测量或已知的物理量与间接测量的物理量之间的函数关系，则 y 的标准误差 s_y 与各 x_i 的标准误差 s_1, s_2, \dots, s_r 之间按随机误差理论有：

$$s_y = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 s_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 s_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_r}\right)^2 s_r^2} \quad (4-23)$$

对于 $y = x_1 x_2 \dots x_r$ 的情况，则可导出相对标准误差的传递公式为：

$$e_y = \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + \dots + e_r^2} \quad (4-24)$$

对于桩基模拟试验自动测试系统，根据以上分析各种误差来源，凡是可避免的影响因素都尽量消除或减到最小，凡系统误差进行必要的修正，最后将其余无法避免的随机误差进行综合。按照应变电测的基本公式，被测应变 ε 为：

$$\varepsilon = K_{\text{仪}} \varepsilon_{\text{仪}} / K$$

式中 k 为应变计灵敏系数， $k_{\text{仪}}$ 为应变仪的灵敏系数（或灵敏度），由 ε 为 $K_{\text{仪}}$ 、 $\varepsilon_{\text{仪}}$ 和 K 的函数。

由式 (4-24) 可得：

$$e_\varepsilon = \sqrt{e_{k_{\text{仪}}}^2 + e_k^2 + e_{\varepsilon_{\text{仪}}}^2} \quad (4-25)$$

式中 $\varepsilon_{\text{仪}}$ 为应变读数， $e_{\varepsilon_{\text{仪}}}$ 为应变读数误差。

根据桩基模拟试验自动测试系统的组成，利用前面的分析来计算应变式传感器和应变仪所组成测试系统的误差，仪器的基本技术指标如下：

载荷传感器：量程 5t，非线性误差 $\leq 0.025\%FS$ ，滞后误差 $\leq 0.035\%FS$ ，重复性误差 $\leq 0.03\%FS$ ；

位移传感器：量程 5mm，非线性 $< 0.2\%FS$ ，示值变化 $\leq \pm 3 \mu\varepsilon$ ，最大误差 $< \pm 5 \mu\varepsilon$ ；

应变仪：基本误差 $\leq \pm 2 \mu\varepsilon$ ；

由于这些误差是正相关的，根据前面的分析，可以用下列方法进行综合：

$$\varepsilon_{\text{载荷}} = 0.025\% + 0.035\% + 0.02\% = 0.08\%FS$$

根据标定后的载荷应变对应直线 $y=552.74286x$ ，其误差 $e_{\text{标定}}=1.78914$ ，转化成应变后

$\varepsilon_{\text{载荷}} = 552.74286 \times 0.08\% \times 5 + 1.78914 = 5 \mu\varepsilon$ ；位移传感器的误差取它的最大误差 $5 \mu\varepsilon$ ；应

变仪的误差也取它的最大误差 $\varepsilon_{\text{应变仪}} = 2 \mu\varepsilon$ 。由于载荷传感器的误差等于位移传感器的误差，

所以此测试系统的误差由式 (4-25) 得：

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_{\text{传感器}}^2 + \varepsilon_{\text{应变仪}}^2} = \sqrt{5^2 + 2^2} \approx 6 \mu\varepsilon。$$

4.3 测量系统软件的编制及说明 [26, 30, 37, 40, 95]

4.3.1 系统总流程图

YJ-22 静态应变测量处理仪系统总流程图如图 4-11 所示。系统复位，从 000H 开始执行程序，仪器会自动执行自诊断程序，若自检正确，仪器会自动显示拨盘数据，以确认拨盘及显示器工作正常，否则自动显示出错代码。将起点拨盘与终点拨盘分别拨到欲测通道区间上，此时设定的终点通道号必须不小于起点通道号，否则测量时会显示出错。按自动键一次，仪器就会自动测量。

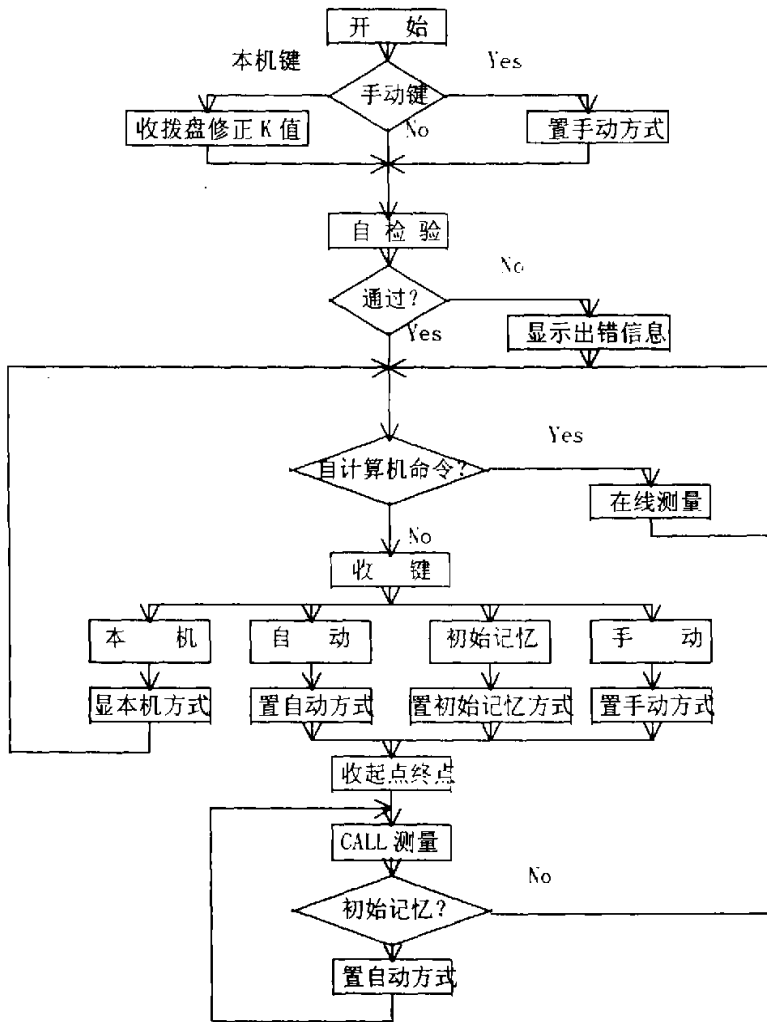


图 4-11 系统总流程图

若要进行应变计的初始调零，按“调零”键即可，持续按该键 3 秒钟，待指示灯熄灭后才真正允许进入初始调零状态。放开该键，按自动键一次，仪器又重新测量一次，并自动将测量值减去初始值。按“手动”键，可测量一次。在计算机联机工作时，“在线”灯会变亮，这时除“本机”键外，其他键均失效。

若测试完毕后,想重新开始,有两个方法:一是按调零键,另一是关机再打开。这两种方法均能使程序从 000H 开始执行。

4.3.2 在线测量主程序流程图

YJ-22 静态应变测量处理仪可通过 YJ-PC II 接口与计算机联机使用,其在线测量主程序流程图如图 4-12 所示。仪器收到计算机命令,如果正确,则进入遥控方式, YJPC 系统提供了如下五项功能:①文件功能,包括初始参数、读取参数、保存参数和退出;②参数的设置,包括通道设置和打印参数;③调零测量;④数据分析包括结果显示和打印结果;⑤定时操作,包括初始时间表、读取时间表、保存时间表、设置时间序列、设置时间表和定时测量。

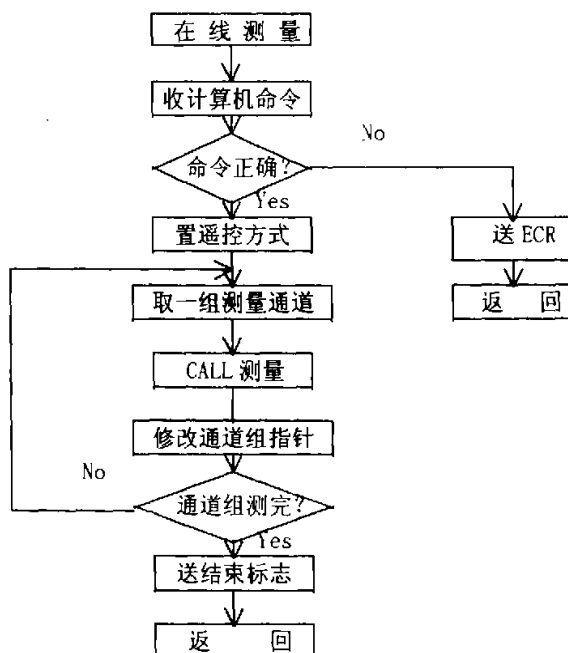


图 4-12 在线测量主程序流程图

4.3.3 子程序流程图

一. 测量子程序流程图

测量子程序流程图如图 4-13 所示,当按下“测量”键或联机测试进入 YJPC 系统的测量功能时,程序进入自动测量过程。指令首先送转换地址,再进行测量并补偿热电势和自动修正桥路非线性,取一组通道开始测量,如果通道组还没有测完,则转去继续测量,并把测量值存入内存。

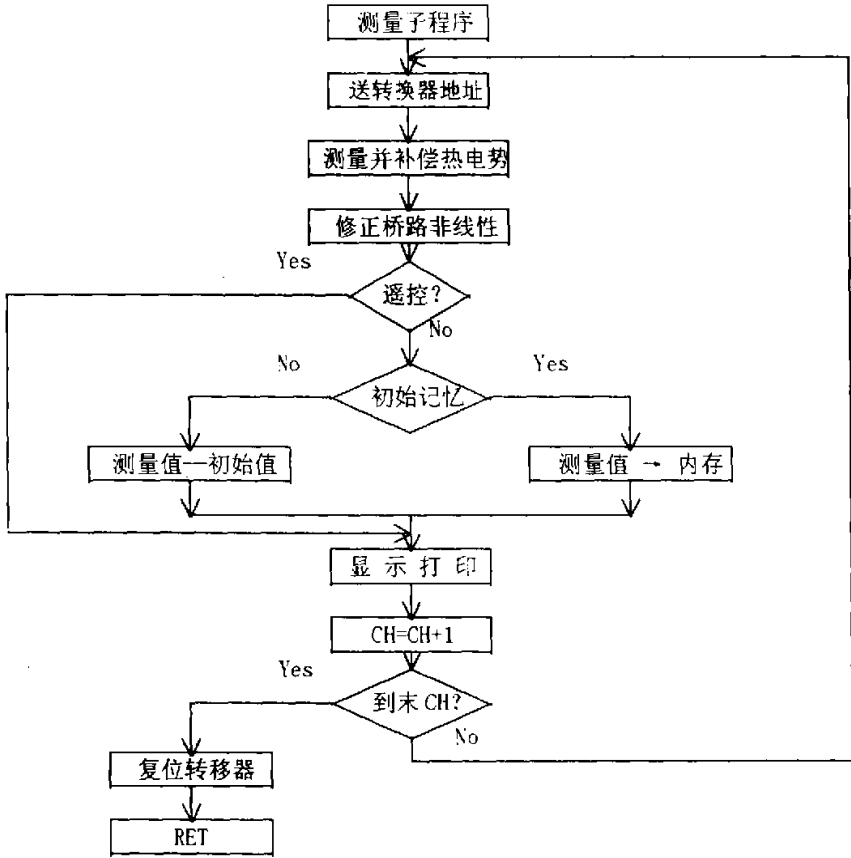


图 4-13 测量子程序流程图

二. 键子程序流程图

1. 键扫描子程序 (SCANK) 流程图如图 4-14 所示。

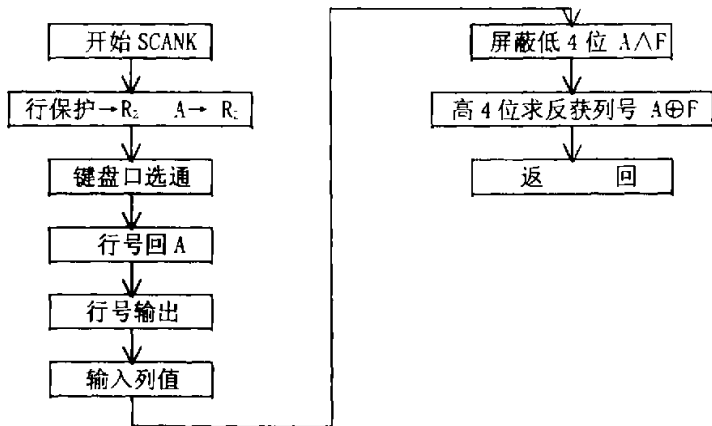


图 4-14 键扫描子程序流程图

2. 键值查表子程序 (LOOKUP) 流程图如图 4-15 所示

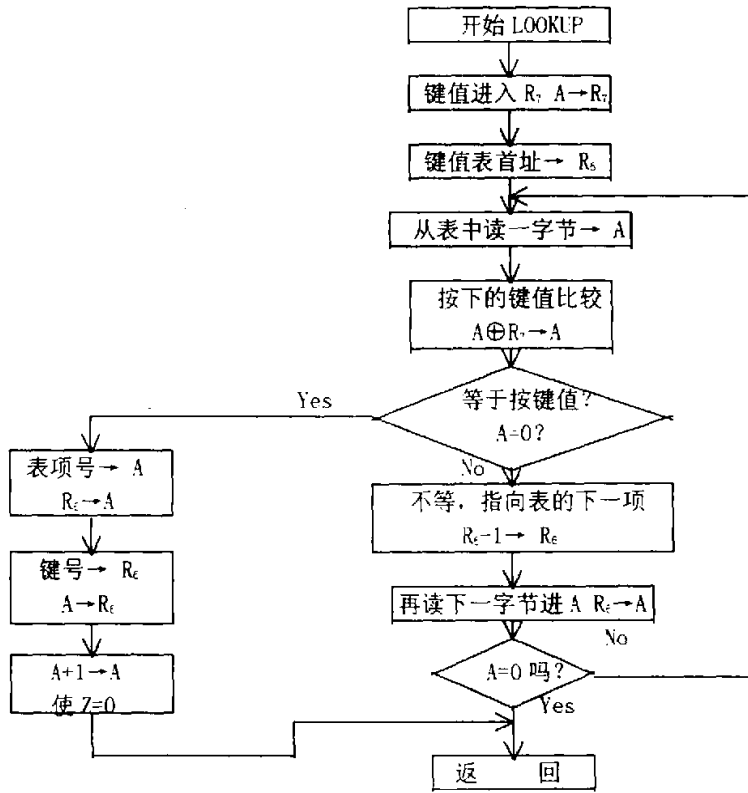


图 4-15 键值查表子程序流程图

3. 更新显示子程序 (DISUP) 流程图如图 4-16 所示

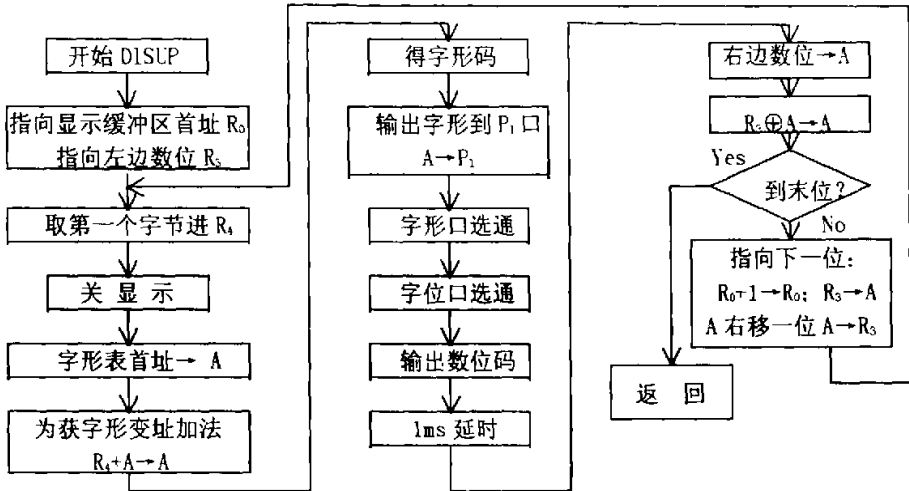


图 4-16 更新显示子程序流程图

4. 查键子程序 (KEYDE) 流程图如图 4-17 所示

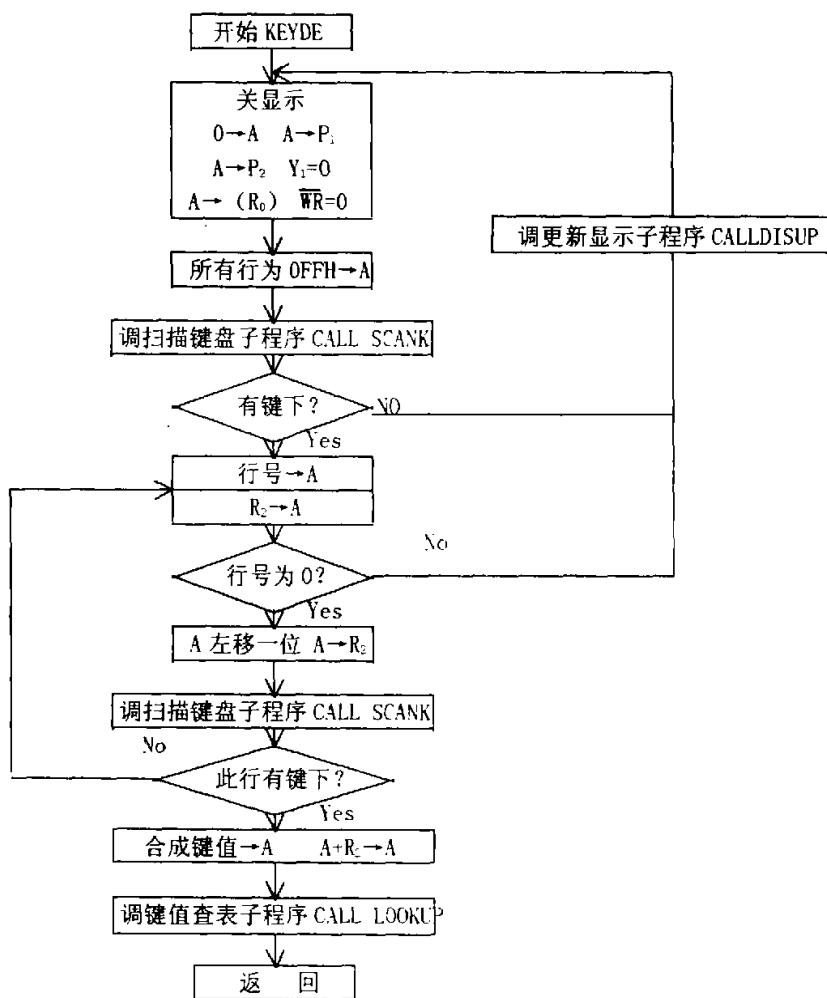


图 4-17 查键子程序流程图

4.3.4 软件编制说明

一. 系统的组成

系统由以下几个文件组成:

- | | |
|----------------|--------|
| 1. YJPC. EXE | 执行文件 |
| 2. YJPC. MNU | 菜单文件 |
| 3. ECAVGA. BGI | 图形驱动文件 |
| 4. MYLIB. DAT | 字库数据文件 |
| 5. MYLIB. NDX | 字库索引文件 |
| 6. CCLTB. DAT | 字库 |

μ 为材料的泊松系数;

ε_1 为第一应变片的测量值;

ε_2 为第二应变片的测量值;

③对三向片 (即 MODE=3) (45°);

$$\sigma_x = (\varepsilon_1 - \mu * \varepsilon_3) * E / (1 - \mu * \mu);$$

$$\sigma_y = (\varepsilon_2 + \mu * \varepsilon_3) * E / (1 - \mu * \mu);$$

$$\sigma_1 = E / 2 * (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) / (1 - \mu) - X / (1 - \mu);$$

$$\sigma_2 = E / 2 * (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) / (1 - \mu) - X / (1 - \mu);$$

$$\tau = E / 2 * (1 + \mu) * X;$$

$$\theta = 1 / 2 * \text{ATAN}(2 * \varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3) / (\varepsilon_1 - \varepsilon_3));$$

式中: $X = \text{sqrt}\{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) * (\varepsilon_1 - \varepsilon_3) - [2 * \varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)] * (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)\}$

σ_x 为 X 方向的应力值;

σ_y 为 Y 方向的应力值;

σ_1 为最大主应力值;

σ_2 为最小主应力值;

τ 为最大剪应力值;

θ 为 X 方向到主应力方向的夹角;

ε_1 为 X 方向应变片的测量值;

ε_2 为 Y 方向应变片的测量值;

ε_3 为 45° 方向应变片的测量值;

2. 结果打印: 打印通道测量结果。

(五) 定时操作

1. 初始时间表: 时间表是定时测量的时间序列, 初始时间表就是把定时时间表置空。

2. 读取时间表: 从指定文件中读取以前设置的定时时间表。

3. 保存时间表: 保存当前的定时时间表到指定文件中, 便于以后多次读取而避免重复设置。

4. 设置时间序列:

设置一组间隔相同的时间于时间表中, 供用户定时测量。系统弹出输入菜单, 要求用户输入时间总数、时间间隔及第一次测量的初始时间。总数必须 < 100 , 间隔以分为单位。时间包括时 (hour)、分 (min)、秒 (sec), (hour ≤ 24 min、sec ≤ 60)。用 $\rightarrow \leftarrow \uparrow \downarrow$ 移动光标或 PgUp、PgDn 翻页, 回车键接收输入, E S C 键退出输入。

5. 设置时间表:

系统弹出定时时间输入框, 供用户设置、浏览及修改定时时间表。输入框要输入定时的时 (hour)、分 (min)、秒 (sec), (hour ≤ 24 min、sec ≤ 60)。用 $\rightarrow \leftarrow \uparrow \downarrow$ 移动光标或 PgUp、PgDn 翻页, 回车键接收输入, Ins 键该时间表后插入一时间表, ESC 键退出时间输入。

6. 定时测量:

按照时间表的时间对设置的通道进行定时测量。

系统会把测量结果保存在指定的文件序列中, 例如: 用户指定的文件名为 user, 定时测量三次, 系统则把测量结果依次保存在 user01.cfg、user02.cfg 和 user03.cfg 三个文件中; 如果用户未指定文件名, 系统自动把测量结果保存在 TCHD 文件序列中 (注意: 用户输入的文件名长度不能超过 6 位)。

系统也会按照用户指定, 把测量结果打印出来。按任意键可退出定时测量。

三. 数据文件格式

选择通道总数@通道是否调零@通道是否有测量值

通道号@通道零值 通道测量值 方式 MODE 系数 K 系数 E 系数 U@

通道号@通道零值 通道测量值 方式 MODE 系数 K 系数 E 系数 U@

通道号@通道零值 通道测量值 方式 MODE 系数 K 系数 E 系数 U@

 EOF

四. 备注

系统为 C++ 编程者提供下列四个子程序:

1. 原型: `int link_mac(int com)`

调用值:

```
int com  串行口号
com=0  com1
com=1  com2
```

返回值: 0 表示成功
 1 表示失败

功 能: 通过指定串行口号向仪器申请联机;

2. 原型: `void ini_com(int com)`

调用值:

```
int com  串行口号
com=0  com1
com=1  com2
char *string  接收字符串指针
```

返回值: 无

功 能: 按以下参数初始化指定的串行口;

波特率: 2400; 起始为: 1 位;
 数据位: 8 位; 停止位: 1 位;
 校验方式: 奇校验 1 位+方式 1 位。

3. 原型: `int recive_string(char *string, int com)`

调用值:

```
int com  串行口号
com=0  com1
com=1  com2
```

返回值: 0 表示(联机成功)接收到机号; 或表示(命令正确)接收到一组仪器的回送数

据;

1 表示联机失败或测试命令错误;

功 能: 从指定串行口接收一字符串;

4. 原型: `int send_string(char *string, int com)`

调用值:

```
int com  串行口号
com=0  com1
com=1  com2
```

返回值: 1 表示发送正确;

0 表示发送错误;

功 能: 从指定串行口发送一测试命令;

命令串格式: "AM 000-009,012,.....\xa\xd"

其中测量通道组不得超过九组;
 通道组之间必须以逗号隔开;
 单点也是一组, 每组三位, 不足时前面填 0;

命令串必须是以换行、回车符结束:

5. 在 C++ 用户文件的头部必须有下行:

```
#include "tecm.h"
```

在 C++ 用户的工程文件中必须有下行:

```
tecm.lib
```

6. C++ 用户的工作流程如下:

a. 对指定的串行口初始化

b. 准备测试命令;

c. 申请联机;

d. 从指定的串行口接收联机信息:

- 联机成功执行以下部署:

- 联机不成功转通讯口出错处理;

e. 从指定的串行口发送测试命令;

f. 从指定的串行口接收测试结果;

- 测试命令错误转相关的出错命令处理程序;

- 正确接收, 判断接收到的字符串长的-2 的字符是否为字符 '\1A', 如果是, 测量结束; 如不是, 则继续接收测量结果;

7. 在一次工作中只对指定的串行口初始化一次。

4.4 数据处理程序设计^[31, 50, 57, 66, 67, 68, 71, 72, 73, 74, 75, 76]

4.4.1 程序设计语言简介

本文在 Windows98 环境下以 Delphi5.0 语言为工具, 编制了数据处理程序。Delphi5.0 是 Inprise 公司最新推出的基于 Pascal 语言的可视化集成开发环境, 它具有如下特点:

1. 是一个可视化的 RAD (Rapid Application Development, 快速应用程序开发) 工具, 具有高效易用、最优的源代码编译器、可视化的快速应用程序开发环境和可扩展的数据技术, 适合各种类型的可视化程序开发。

2. 使用的程序语言是 Object Pascal, 它是一种面向对象的结构化程序设计语言, 增强了异常状况的处理能力以及类的封装能力, 具有自动的异常状况处理能力。

3. 开发出来的应用程序与 Windows95、Windows98 或 WindowsNT 的操作环境无关, 可以直接在 Windows 下运行。

4. 有强大的数据库支持能力, 程序设计人员只通过 BDE (Borland DataBase Engineer, Borland 数据库引擎) 工具而不需与数据库文件直接打交道, 就可以操作和处理各个数据库文件。

5. 用 Delphi5.0 开发的应用程序可以调用 C++ 的 DLL 和 VBX, 同样, 用 C++ 开发的应用程序也可调用 Delphi 所产生的 DLL。

6. Delphi5.0 具有集成的符合工业级标准的报表生成器, 并可在设计状态浏览数据。

4.4.2 串行通信的实现

在桩基模拟试验自动测试系统中, YJ-22 静态应变测量处理仪与计算机之间的通信是通过 RS-232 接口 (串行口) 实现的。该接口标准是美国 EIA (电子工业协会) 与 BELL 公司一起开发, 并于 1969 年公布的通信协议。它适合于数据传输速率在 0—20kbit/s 范围内的通信。

在 Windows98 环境下用 Delphi5.0 实现串行通信有三种方法: 第一种, 用控件 TMSComm 来实现串行通信; 第二种, 调用 Windows98 下的 API 函数来实现串行通信; 第三种, 熟悉 C 或 C++ 等

其它语言的用户可以将自己的持续编译链接为 DLL (动态链接库), 这样 Delphi 就可以调用 DLL 里的函数来实现串行通信。

在本程序中使用了 API 函数来实现串行通信。

一. 串行通信的初始化

在串行通信前, 需要对使用的通信端口进行初始化设置。初始化设置内容包括指定使用哪一个端口, 与该端口相应的输入输出队列的大小, 该端口的通信速率、奇偶校验、数据流的起始位、停止位以及字节长度, 是否使用握手控制等。如下代码所示:

```

...
hcom:=Createfile( 'com1', generic_read or generic_write, 0,
                 nil, open_existing, 0, 0);
if hcom<>inralid_hand_value then
begin
    if getcommstate(hcom, hdcB) then
    begin
        hdcB.BaudRate:=2400;
        hdcB.Bytesize:=8;
        hdcB.StopBits:=onestopbits;
        hdcB.Parity:=noparity;
        success:=Setcommstate(hcom, hdcB);
    end
end
...

```

函数 Createfile 用来打开串口, 串口被作为文件打开, 返回的文件句柄放在 Thandle 类型变量 hcom 中, 后面的函数要引用它。Getcommstate 函数可以得到当前串口状态, hdcB 是 TDCB 类型的记录变量, 它的每个域代表着串口的某种属性。修改 hdcB 中的四个域, 即串口的四种属性后, Setcommstate 函数把新的属性赋予串口。

打开串口后, 根据情况还要对串口进行其它的设置工作, Setupcomm 函数用于设置串口缓冲区的大小。Purgecomm 用于清除缓冲区, 以免一次读写未完的部分影响下一次操作。对串口的读写操作可由函数 WriteFile 和 ReadFile 完成。

```

Setupcomm(hcom, 4096, 4096); //设置收发缓冲区都为 4096 字节
WriteFile(hcom, outbuf, 1, outnum, nil); //写一个字符列发送缓冲
ReadFile(hcom, inbuf, 1, innum, nil); //从接收缓冲读一个字符
Purgecomm(hcom, PURGE_EXCLEAR); //清除接收缓冲区

```

二. 串行通信中的错误处理

对于通信来说, 保证其可靠性是至关重要的, 也就是要保证通信的正常进行和通信数据的有效性。

1. 保证通信的正常进行

在利用 Windows 的串行设备驱动程序 comm.DRV 进行通信的过程中, 一旦发生通信错误, 则此后所有对串口的读写都被禁止, 直到错误被清除为止, 所以在进行串行通信的程序中, 要及时清除通信过程中产生的错误, 以保证通信的正常进行。错误的清除可以用函数 GetcommError 来完成。

2. 保证通信数据的有效性

通信过程中一旦发生错误, 则从串行端口收到的数据就极有可能是不正确的。这时, 就需要在程序设置的错误处理过程中, 放弃当前所收到的数据并清空输入缓冲区, 接着采取要求通信对方重发数据或其它的错误处理。

4.4.3 数据处理程序

一. 程序功能模块

桩基模拟试验数据处理程序的功能模块如图 4-18 所示。

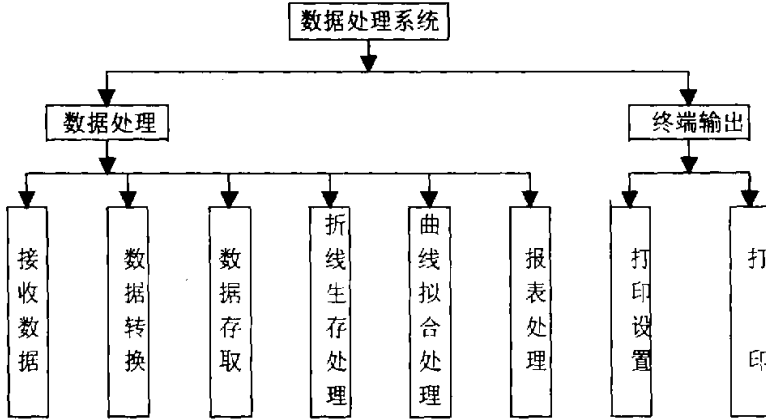


图 4-18 数据处理持续功能模块

1. 接受数据

在前一章已介绍了 YJ-22 型静态应变处理仪采集的数据存取格式如下：

通道号	通道零值	通道测量值	方式 MODE	系数 K	系数 E	系数 U
通道号	通道零值	通道测量值	方式 MODE	系数 K	系数 E	系数 U
通道号	通道零值	通道测量值	方式 MODE	系数 K	系数 E	系数 U

...

并且每测量一次的结果就以一个文件名保存。由于根据误差理论，测量值只是一个与真值有偏差的近似值，单次测量包含多种误差因素，通常采用多次测量求均值的方法逼近真值，以减少误差。根据这一原则，我们必须在每级加载的情况下对各个参数进行多次测量。这样每次测量的参数保存在不同的文件名中，不利于我们的数据处理。所以在本程序中，利用了系统的 COPY 功能把所有的数据文件拷贝到同一个文件名中，并且利用了 Delphi 中的 pos 函数选择自己所需的数据，以便于以后的数据处理。

2. 转换数据

由于 YJ-22 型静态应变处理仪采集到的数据是以应变的形式保存的，但在桩基模拟试验中，我们必须得到载荷的单位为 KN，位移的单位为 mm，这样才能符合规范和表达习惯。

根据传感器和静态应变仪的调试和校准，得出了应变 (μm) \rightarrow 位移 (mm) 的转换公式为：

$$200 \mu m = 1mm;$$

$$\text{应变} (\mu m) \rightarrow \text{载荷 (KN)} \text{ 的转换公式为: } 552.78 \mu m = 10KN.$$

通过在程序中设置以上的转换公式后就能得到我们所需求的单位形式。同时根据第二章自动测试系统的组成可知，为了减小误差，在桩顶和试件顶板上各对称安置了两个位移传感器，因此在进行数据转换的同时应该对其进行求均值。

3. 数据存取

转换后的数据进行存盘后，可随时打印输出或在日后数据处理时调用。严格地说在某种状态的工况下的测试结果是不可重复的，为此在程序中设置了同文件名覆盖与否的选择项，这是一项安全措施，能有效地防止重要文件被意外覆盖所造成的损失。

数据文件采用对用户开放的结构形式，可方便地被用户和其他应用软件调用，采用顺序文件

的方式以文本文件保存转换后的数据。

4. 折线的生成

由于桩基模拟试验过程是一动态过程，在试验进行中应该能直观动态地反映试验的过程，因此应该把每级荷载下测量的数据逐一连接起来形成一条 P—S 折线。

为了得到 P—S 折线，在本程序中利用 Delphi 中 Canvas 对象画线调用 MoveTo 和 LineTo 两个方法。MoveTo 方法可以定位线的起始点，LineTo 方法画线，所以在 (x1, y1) 和 (x2, y2) 之间画线，可以使用语句：

```
Canvas.MoveTo(x1, y1);
Canvas.LineTo(x2, y2);
```

其大致图形如图 4-19 所示，纵轴 P 表示 P—S 数据表中桩顶荷载或试件荷载，单位为 KN，精确到 0.001KN；横轴 S 表示表示 P—S 数据表中的桩顶位移或试件位移，单位为 mm，精确到 0.001mm，并且 P 与 S 应该一一对应。

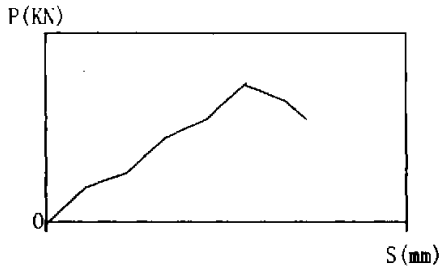


图 4-19 P—S 折线图

5. 曲线拟合处理

为了能形象地表达桩和试件顶板的受力过程，应该在 P—S 折线的基础上，对其进行曲线拟合，得到一条 P—S 的回归曲线，如图 4-20 所示。其具体算法思想见下一节。

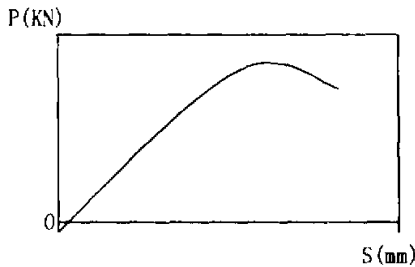


图 4-20 P—S 曲线图

6. 报表处理

为了对试验的原始数据进行整理和保存，应该使其以报表的形式打印出来，如下所示：

桩基模拟试验原始数据报表

桩顶荷载 (KN)	桩顶位移 (mm)	顶板荷载 (KN)	顶板位移 (mm)
0	0	0	0
2.641	0.087	3.091	0.057
8.918	0.387	9.368	0.275
...			

其方法是利用 Delphi5.0 组件板【QuickReport】选项卡提供的组件可视化地建立数据库报表，其用法和建立普通窗体的方法非常相似。使用 QuickReport 类组件建立报表时，报表可以分为不同的带，即信息的行区。在每个信息行中输出数据，也可在信息行中显示页码、脚注、题注等。

建立数据库报表时，只需将组件板【QuickReport】选项卡上的 QuickRep 组件放置到窗体中，

添加一个或多个信息行区（即 QRBand 组件），在信息行区上放置数据提示报表组件（QRLabel 组件、QRDBLabel 组件、QRRichText 组件、QRDBRichText 组件等），将数据提示报表组件与数据源组件相连，其数据来自原始数据表。

7. 打印输出

最后应对其处理过后的数据以上述报表和 P—S 折线图、P—S 曲线图的形式打印出来。

在 Delphi 中预览数据库报表使用的是 QuickRep 组件的 Preview 方法，打印数据库报表使用的是 QuickRep 组件的 Print 方法。

如果要打印图形，就的使用 Tprinter 对象，要想使用 Tprinter 对象，先将在主项目文件中的 uses 语句中包括进 Printers 单元之后，不必申明 Tprinter 对象，因为 Printers 单元自动申明了一个 Tprinter 类的对象 printer。

打印图形时，要在调用 Tprinter 类的两个方法 BeginDoc 和 EndDoc 之间调用所有真正的画匠方法。由于 Tprinter 类自身带有 Canvas 对象，因此这并不难实现。BeginDoc 的作用是为打印机设置内存缓存区以支持高分辨率；EndDoc 的作用是消除内存缓存区。

打印前，可用 PrintDialog 来设置打印机选项，PrintDialog 组件位于组件板的【Dialogs】选项卡上，调用 PrintDialog 组件的 Execute 方法就可以打开【打印】对话框，进行打印设置和启动打印等。

二. 曲线拟合算法

在实际测试中经常会遇到这样的情况，在对某个研究对象进行测试时，即便将所得数据画到一张方格纸上，也难于辨认被测对象的真实规律，在这种情况下，人们总是希望能通过这些数据找到一个能简洁地描述所测对象真实规律的函数关系或数学模型。这种关系或模型一般可以用几个特征参数来表征，如果能找到，就能把测试对象的变化规律用某种函数表达式或数学模型描述出来，它比测试数据不但在形式上，而且能更深刻地揭示研究对象的本质。在数学上把这种通过一定量的测试数据寻求相应函数或数学模型的过程称为函数拟合或曲线拟合。

1. 最小二乘法原理

在误差理论中最小二乘法的基本思想是在具有等精度的多次测量中，最可靠、最可信的测试值等于各测量值的残差平方和为最小时所求得的值。用数学表达式可表示为：

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \text{最小} \quad (4-26)$$

如果线性方程为 $y = a_0 + a_1 x$ ，则

$$u = \sum [y_i - (a_0 + a_1 x_i)]^2 = \text{最小} \quad (4-27)$$

因为

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial a_0} &= -2(y_1 - a_0 - a_1 x_1) - 2(y_2 - a_0 - a_1 x_2) - \dots \\ \frac{\partial u}{\partial a_1} &= -2x_1(y_1 - a_0 - a_1 x_1) - 2x_2(y_2 - a_0 - a_1 x_2) - \dots \end{aligned} \quad (4-28)$$

为此应 $\frac{\partial u}{\partial a_0} = 0$ ， $\frac{\partial u}{\partial a_1} = 0$ ，整理得

$$\begin{aligned} n a_0 + (\sum x_i) a_1 &= \sum y_i \\ (\sum x_i) a_0 + (\sum x_i^2) a_1 &= \sum x_i y_i \end{aligned}$$

所以

$$a_0 = \frac{\sum y_i \sum x_i^2 - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \tag{4-29}$$

$$a_1 = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

2. 多元线性回归方程的求法

多元线性回归分析的原理与简单线性回归分析的原理相同，但在计算上要复杂得多。先研究两个自变量线性回归问题，其方程式为：

$$Y = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 \tag{4-30}$$

确定上式中的常数 a 和回归系数 b_1 、 b_2 的数值，可以使用最小二乘法，使剩余平方和为最小。设

$$Q = \sum (Y - \hat{Y})^2 = \sum (Y - a - b_1 X_1 - b_2 X_2)^2$$

用偏导数的方法使

$$\frac{\partial Q}{\partial a} = 0 \quad \frac{\partial Q}{\partial b_1} = 0 \quad \frac{\partial Q}{\partial b_2} = 0$$

求得三个规范方程式如下：

$$\begin{aligned} na + b_1 \sum X_1 + b_2 \sum X_2 &= \sum Y \\ a \sum X_1 + b_1 \sum X_1^2 + b_2 \sum X_1 X_2 &= \sum X_1 Y \\ a \sum X_2 + b_1 \sum X_1 X_2 + b_2 \sum X_2^2 &= \sum X_2 Y \end{aligned} \tag{4-31}$$

常数项由下式确定

$$a = \bar{Y} - b_1 \bar{X}_1 - b_2 \bar{X}_2$$

将 a 的数值代入式 (6-6)，上列方程式可变成：

$$\begin{aligned} (\bar{Y} - b_1 \bar{X}_1 - b_2 \bar{X}_2) \sum X_1 + b_1 \sum X_1^2 + b_2 \sum X_1 X_2 &= \sum X_1 Y \\ (\bar{Y} - b_1 \bar{X}_1 - b_2 \bar{X}_2) \sum X_2 + b_1 \sum X_1 X_2 + b_2 \sum X_2^2 &= \sum X_2 Y \end{aligned}$$

整理后得：

$$\begin{aligned} \sum (X_1 - \bar{X}_1)^2 b_1 + \sum (X_1 - \bar{X}_1)(X_2 - \bar{X}_2) b_2 &= \sum (X_1 - \bar{X}_1)(Y - \bar{Y}) \\ \sum (X_2 - \bar{X}_2)(X_1 - \bar{X}_1) b_1 + \sum (X_2 - \bar{X}_2)^2 b_2 &= \sum (X_2 - \bar{X}_2)(Y - \bar{Y}) \end{aligned}$$

设 $x_1 = X_1 - \bar{X}_1$ ， $x_2 = X_2 - \bar{X}_2$ ， $y = Y - \bar{Y}$ ，则得：

$$\begin{aligned} b_1 \sum x_1^2 + b_2 \sum x_1 x_2 &= \sum x_1 y \\ b_1 \sum x_1 x_2 + b_2 \sum x_2^2 &= \sum x_2 y \end{aligned} \tag{4-32}$$

求解上列方程式即可得 b_1 、 b_2 之值，进而得出回归方程式如下：

$$\hat{Y} = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 \tag{4-33}$$

上述方法可以推广到多个自变量的情况，设因变量 Y 受 n 个自变量 X_1, X_2, \dots, X_n 的影响，其回归方程式为：

$$Y = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_n X_n \quad (4-34)$$

根据最小二乘法原理，选取 a, b_1, b_2, \dots, b_n 之值，设

$$Q = \sum (Y - \hat{Y})^2 = \sum [Y - (a_0 + b_1 X_1 + \dots + b_n X_n)]^2$$

根据求二元线性回归的方法可以得到下列方程式：

$$\begin{aligned} \sum x_1 y &= b_1 \sum x_1^2 + b_2 \sum x_1 x_2 + \dots + b_n \sum x_1 x_n \\ \sum x_2 y &= b_1 \sum x_1 x_2 + b_2 \sum x_2^2 + \dots + b_n \sum x_2 x_n \\ &\dots \\ \sum x_n y &= b_1 \sum x_1 x_n + b_2 \sum x_2 x_n + \dots + b_n \sum x_n^2 \end{aligned} \quad (4-35)$$

解以上方程式就可以求得 b_1, b_2, \dots, b_n 之值，再代入下式就可求得 a

$$a = \bar{Y} - b_1 \bar{X}_1 - b_2 \bar{X}_2 - \dots - b_n \bar{X}_n$$

从而可以求得多元线性回归方程式如下：

$$\hat{Y} = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_n X_n \quad (4-36)$$

3. 曲线拟合

在桩基试验中载荷与位移对应的回归曲线为多项式函数，如下所示：

$$y = a + b_1 x + b_2 x^2 + \dots + b_n x^n \quad (4-37)$$

为了求得系数 a, b_1, b_2, \dots, b_n 之值，设：

$$X_1 = x, X_2 = x^2, \dots, X_n = x^n \quad (4-38)$$

把式 (4-38) 代入式 (4-37) 可得到式 (4-34)，再根据多元线性回归的方法就可求得相应的回归曲线，在桩基模拟试验中载荷与位移对应的回归曲线的最高次数达到四次就足够了。其程序代码段（具体程序见附录）如下所示：

```

...
canvas.Rectangle(35, 35, width-35, height-35); //画坐标轴
with canvas do
begin
  for i:=0 to 9 do
  begin
    TextOut(10, height-(i*18+43), floattostr((int(max1)+5)/10*i));
    Textout(i*33+28, height-28, floattostr((int(max2)-1)/10*i));
    Pen.Width:=2;
    moveto(35, height-(i*18-36));
    LineTo(32, height-(i*18-36));
    moveto(i*33+35, height-35);
    lineto(i*33+35, height-32);
  end;
  TextOut(5, height-223, 'P(KK)');

```

```

        TextOut(352,height-28,'S(mm)');
    end;
end;
...
if absL<>0 then//求回归系数
begin
    b1:=(M11*L10+M12*L20+M13*L30+M14*L40)/absL;
    b2:=(M21*L10+M22*L20+M23*L30+M24*L40)/absL;
    b3:=(M31*L10+M32*L20+M33*L30+M34*L40)/absL;
    b4:=(M41*L10+M42*L20+M43*L30+M44*L40)/absL;
    b0:=c1-b1*a1-b2*a2-b3*a3-b4*b4;
end
else
    messagedlg('求各系数时出错!',mterror,[mbok],0);
q:=trunc(form3.image1.height-35-(form3.image1.height-70)*b0/(int(max1)-5));
//画回归曲线
if q>form3.image1.Height-35 then
    r:=q-(form3.image1.Height-35)
else
    r:=0;
with form3.Image1 do
begin
    for i:=35 to trunc((width-70)*max2/(int(max2)-1)+35) do
    begin
        x:=(i-35)*(int(max2)+1)/(width-70);
        y:=b0-b1*x-b2*sqr(x)-b3*sqr(x)*x-b4*sqr(sqr(x));
        j:=trunc(height-35-(height-70)*y/(int(max1)-5))-r;
        canvas.Pixels[i,j]:=clblue;
    end;
end;
form3.visible:=true;
end;

```

三. 操作方法

在 Windows98 操作环境下启动运行该程序后，在屏幕上显示图 4-21 静态应变数据处理程序的界面。用鼠标点击编辑菜单下的接收数据，就可把应变仪采集到的数据经过初步处理后接收入静态应变数据处理程序界面的左边数据表中，再点击转换数据项，就可把左边数据表中的数据经过单位换算和处理后输入到右边数据表中，以上两步的结果如图 4-22 所示。如果要打印数据报表，点击编辑菜单下的打印数据即可。为了获得桩顶载荷与桩的位移、试件顶板载荷与试件位移的 P-S 折线和 P-S 拟合曲线，只要点击绘图菜单下的画折线和曲线拟合即可，其结果分别如图 4-23、图 4-24 所示。如果要保存处理过后的数据和图形，只要分别单击文件菜单下的保存即可。

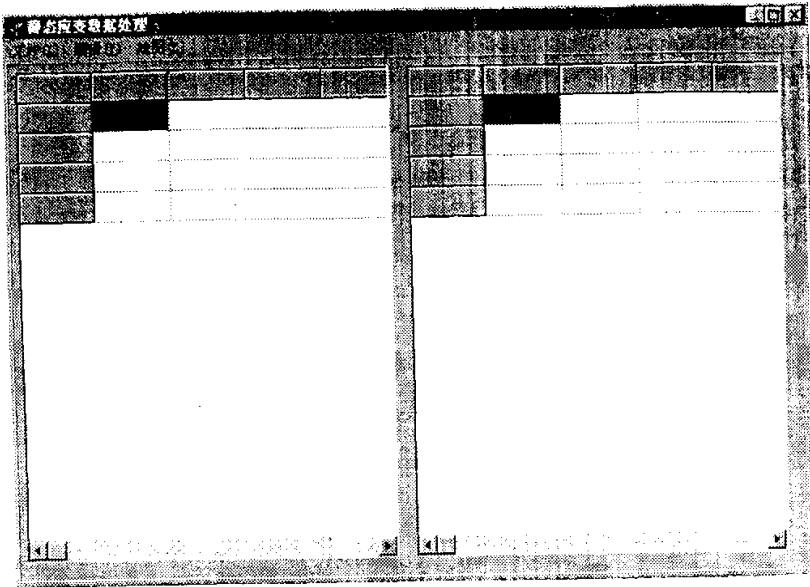


图 4-21 静态应变处理程序界面

数据接收	数据转换	打印数据
1	1	1
2	2	2
3	3	3
4	4	4
5	5	5
6	6	6
7	7	7
8	8	8
9	9	9
10	10	10
11	11	11
12	12	12

位移3	位移4	位移5	位移6	位移7	位移8	位移9	位移10	位移11	位移12																																								
11	-12	2.641	0.087	3.091	0.057	9.280	0.387	9.730	0.227	8.918	0.387	9.368	0.225	10.329	0.452	10.778	0.262	10.202	0.45	10.852	0.285	10.148	0.45	10.598	0.265	10.112	0.452	10.582	0.255	13.241	0.597	13.691	0.35	13.060	0.595	13.510	0.347	15.955	0.75	16.405	0.445	15.611	0.75	16.061	0.442	17.366	0.937	17.816	0.502

图 4-22 接收和转换数据后的界面

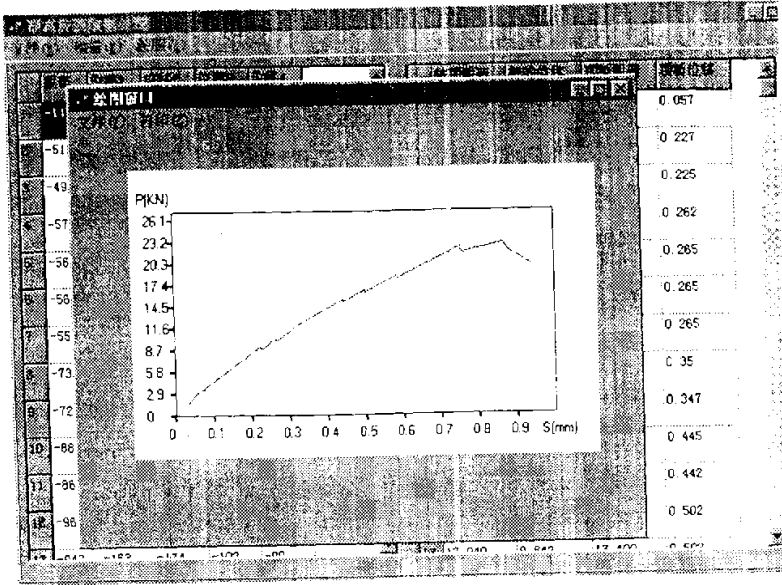


图 4-23 画 P-S 折线的界面

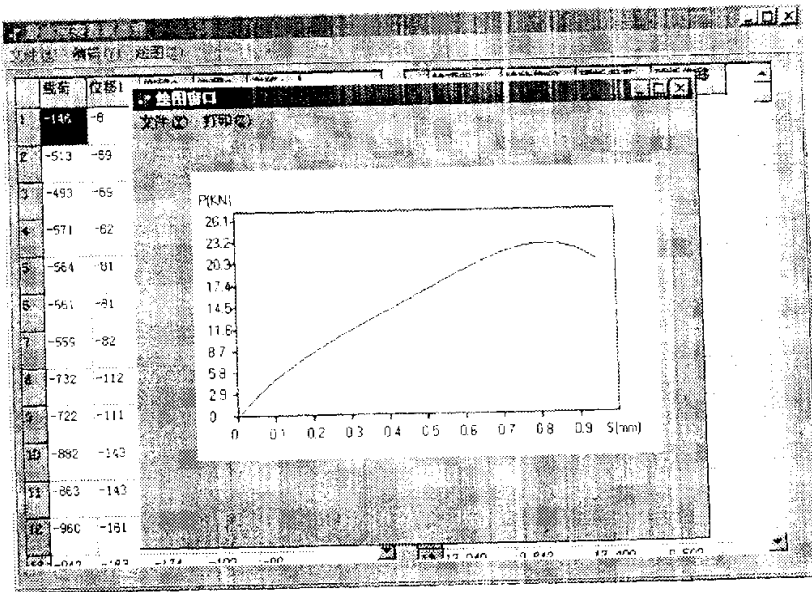


图 4-24 P-S 曲线拟合的界面

第五章 自动测试系统的应用

5.1 桩基模拟试验简介

其实在第二章中我们已对桩基模拟试验进行了概括,在本章为能说明自动测试系统的应用只对其作一些必要的补充:

1. 试验桩型情况

试验桩为直径 150mm 的空心钢桩,质量为 45Kg,长度为 1800~2100mm,其中可调长度为 300mm,传动方式靠桩底的螺杆传动,其长度的调整依据试件的厚度而定。

2. 加载系统简介

在试验的初期使用的加载系统是螺杆加压,它的原理是通过钢丝绳所吊的水箱加压,传动装置为螺杆加压,传动比设计为 1:19。加压螺杆为双向螺纹,上部螺纹所绕的钢丝绳控制水箱的升降,当它彻底放松时,表示荷载已传递到与桩端接触的压头(即荷载传感器)上;卸载时通过该钢丝绳将水箱往上提即可,下部螺纹所绕的钢丝绳通过箱型梁的内部直接连接水箱。该系统最大的优点是每级荷载可以稳定,但由于螺杆的摩阻力很大,达不到设计的传动比,往往达不到我们所要求的试验载荷。

由于螺杆加压的实际荷载达不到要求,所以在试验的后期阶段把加载系统改为了油压加载,此油压系统的最大荷载可达到 15T,完全能满足我们的需要,但油压加载有时荷载不够稳定。

3. 试验用的试件

在本文中选用了桩基试验中的第一批试件,对本文组建的自动测试系统的应用进行说明,试件原材料为水泥、石膏、细砂,其配方号为 555,各试件的尺寸和小样的强度见表 2—3。

4. 对自动测试系统的要求

在第二章中已提及了桩基模拟试验对自动测试系统的要求,其主要是:能自动地测量模拟桩的载荷量、模拟桩的位移量、试件的载荷量、试件的位移量;对这些参数的测量要能够精确到 $1\mu\text{m}$;对所测试的参数能自动地进行数据处理,并能绘制和打印出 P—S 曲线图;对所测试的参数能以报表的形式打印出来。

5.2 试验的基本步骤

试验的基本操作规程与步骤如下:

1. 启动油压系统,使桩顶载荷传感器随油缸的缩进而提升,使其处于悬空状态;
2. 左右滑车根据所要测试的试件的尺寸调整,使两边对称均匀到位,调整的方式可根据试验架横梁内侧的行程刻度而定。两对称支座之间的净空为 $120-2\times 12=96\text{cm}$,可适应的试件可调长度:120-300cm(即滑车的行程范围);
3. 将滑车与试验架相连的四个固定螺丝锁定;
4. 将四个滑车轨道上八个支撑座到位,并用扳手调整支撑座上的螺帽上旋,顶住滑车,同时锁紧滑车上的四个卡口器;

5. 利用定滑轮装置将钢桩吊入试验架内，使其与压头接触，但不受力。根据试件的厚度调整柱长（通过桩下端的内嵌螺杆调整）；

6. 利用小车将试件放置在已固定好的滑车的钢梁上，使试件的中心与桩的中心对准，同时在试件的两边用两根槽杆锁紧试件；

7. 启动油压系统，使桩顶载荷传感器随油缸的伸出而下降，使其与桩顶正好接触但不受力；

8. 压头调整后，用定位装置将桩上下卡住，使桩保持垂直，即压头、桩、试件的中心在一条直线上；

9. 调整上下四个位移计、以及载荷传感器，将各传感器接到应变转换箱上，把转换箱与 YJ-22 型静态应变处理仪相连，再把应变仪通过计算机的 COM1 口与计算机相连；

10. 把自动测试系统连接好以后，启动 YJ-PC 系统，进入系统功能进行如下的操作：

①通道设置 点击通道设置菜单项后，系统会把通道设置的表图显示出来，在这里有五个传感器接入测试系统，所以有五个通道要进行设置，被设置的通道变成灰色；

②调零 点击调零菜单项后，系统对上面设置的五个通道逐一测量，获取初始值（如果不调零，各通道的初始值为 0）；

③设置时间序列 点击定时操作菜单中的设置时间序列，系统弹出输入菜单，要求用户输入时间总数，时间间隔及第一次测量的初始时间（时间总数必须小于 100，间隔以分为单位）；

④定时测量 点击定时操作菜单中的定时测量，系统会按照以上的设置进行定时测量（测量的数据保存在指定的文件中）；

11. 启动油压系统使试件受压（要特别注意其加压时间应该根据定时测量设置的时间和屏幕上反应的数据而定）直到试件破坏；

12. 卸载，将设备和仪器复位，退出 YJ-PC 系统；

13. 启动静态应变数据处理程序进行数据处理（其具体操作见第四章中数据处理程序的操作方法）；

14. 将破坏的试件残余消除，并切割小试样以备做小试样试验，测试其抗压、抗弯强度以及相关的力学性能。

5.3 试验分析^[7, 12, 16, 17]

一. 试验数据图表分析

第一批试件的实验原始数据见后面的桩基模拟实验原始数据报表，利用静态应变数据处理软件，可以分别得出各试件的桩顶载荷与桩的位移、试件顶板载荷与试件位移的 P—S 折线图和 P—S 曲线图，在此只列出了各试件顶板的 P—S 折线图，分别如图 5-1，图 5-2，图 5-3，图 5-4 所示（由于加载系统的原因，其中 3#试件进行了两次加压，3' 为第一次加压的情况）。

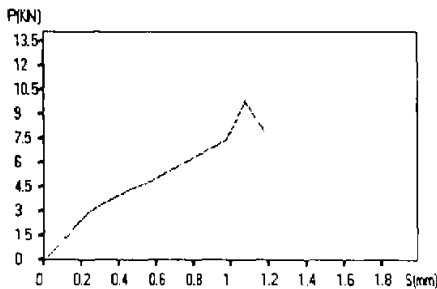


图 5-1 1#试件的 P—S 折线图

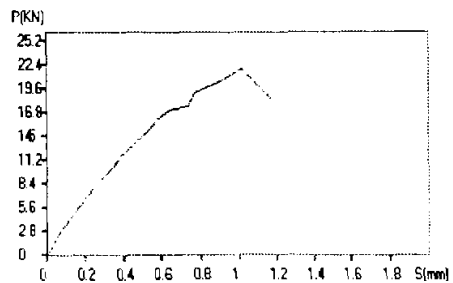


图 5-2 2#试件的 P—S 折线图

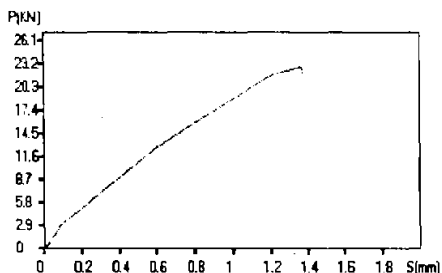


图 5-3 3#试件的 P—S 折线图

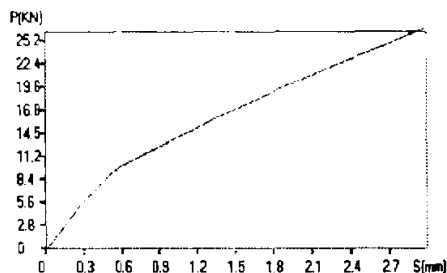


图 5-4 3'试件的 P—S 折线图

二. 试验数据的结果分析

试件破坏时，应是试件内部的正应力达到试件的某一极限强度时。结合试件的受力情况，同时考虑试件的材料为脆性材料，试件（即模拟顶板）的破坏主要是从底部中线断裂。因此试件的破坏极限强度应为试件的抗弯强度，即：

$$\sigma_{\max} = \frac{3\gamma L^2}{4h} + \frac{3F(2L-D)}{4bh^2} = [R_t] \quad (5-1)$$

上式的推导主要是基于把试件看作较理想的简支梁来计算的。从整个试件的尺寸来分析，作为简支梁，试件的宽度偏大。但是作为薄板来分析，试件的厚度又较大，薄板的假设是要求其厚跨比远大于 1/5-1/8，第一批试验的 3 个试件的厚跨比分别为 6、5、4，不太符合假设。并且从试件的边界条件来看（作为支座的两对边不完全为简支，另两边为自由），同时装置的影响因素很多，计算很复杂，因此该批试件是处于梁与薄板之间的过渡结构，严格的来说既不属于梁也不属于薄板。

但为方便起见，先忽略一些次要因素，把试件作为最简单的简支梁来计算，即根据原推导的公式来进行分析。不过对于上式需作几点说明：①作为简支梁的假设前提是不考虑支座箱型梁的刚度影响，把箱型梁视为刚度足够大；②在计算梁的抗弯模量时，梁的宽度应取实际宽度 b，不宜取 b=D；③由于桩径的尺寸相对于试件板面的尺寸很小，可把桩的竖向荷载视为集中荷载来计算；④试件的长度的选取，因为试件两端放置在宽度为 12cm 的箱型梁上，取梁的中线为支撑，两端各减去 6cm。试件的计算跨度 L 应为原试件的总长减去 12cm。

综上所述，式 (5-1) 可简化为：

$$\sigma_{\max} = \frac{3\gamma L^2}{4h} + \frac{3FL}{2bh^2} = [R_t] \quad (5-2)$$

根据式 (5-2)，结合试验数据以及试件的材料性能与尺寸，可得出下列参数表如表 5-1 所示。

表 5-1 试验数据计算表

编号	试件长度 (m)	顶板极限荷载 (N)	对应原型极限荷载 (KN)	σ_{\max} (MP _a)	实测抗弯强度 (MP _a)	对应顶板位移 (mm)	对应原型顶板位移 (mm)
1#	1.2	10500	13650	0.513	0.56	1.08	14
2#	1.5	23320	30316	0.632	0.68	1.04	13.5
3#	1.6	24350	31655	0.420	0.56	0.873	
3'	1.6	28460	37000	0.477	0.56	2.99	

注：①3' 表示试件 3 号第一次预压的数据；

②原型对应的极限荷载等于模型极限荷载的 13 倍，即乘以应力相似比。

③原型对应的顶板极限位移等于模型顶板极限位移的 13 倍，3 号试件未计。

分析表 5-1 可知，通过公式 (5-2) 计算的最大应力值小于实测抗弯强度。试件的极限荷载与试件的尺寸（长、宽、厚度）以及试件的材料强度有关。利用相似原理可推知，将试件的尺寸乘以几何相似比即得原型对应的尺寸。当溶洞的跨度为 12 米，宽度为 10 米时，厚度为 2 米的灰岩顶板的极限荷载为 1365 吨。当溶洞的跨度为 15 米，宽度为 10 米时，厚度为 3 米的灰岩顶板的极限荷载为 3031 吨。当溶洞的跨度为 16 米，宽度为 10 米时，厚度为 4 米的灰岩顶板的极限荷载超过 3700 吨。

根据实测的小样抗弯强度（由标准的材料实验机所测得）与由此自动测试系统测试的参数计算出的 σ_{\max} 值，可计算两者的比值关系：

1#试件： $0.513 \div 0.56 \times 100\% = 91.6\%$

2#试件： $0.632 \div 0.68 \times 100\% = 92.9\%$ 。

3#试件： $0.420 \div 0.56 \times 100\% = 75.0\%$ 。

3'试件： $0.477 \div 0.56 \times 100\% = 85.2\%$ 。

三. 试验结论

从以上的试验分析可以得出以下结论：

① 从载荷来看，顶板的荷载主要是安装在桩顶的位移传感器所量测的数值加上钢桩桩身的自重。而顶板的位移通过安装在桩顶左右两侧的两个位移传感器，以及安装在顶板上的两个位移传感器来量测，并经过分析处理得出。

② 试件加载时，作为试件两端支座的箱型梁（由两根 12.6 号槽钢焊接而成）的刚度不是足够大时，肯定有一定的变形，从而会分担一定比例的桩顶荷载。实际上，试件破坏时，桩顶的极限荷载应小于载荷传感器上的读数所显示的荷载。

③ 3 号试件之所以经过两次加载，关键是试验装置的影响。第一次加载时，由于试验装置加载系统的荷载达不到试件的极限荷载，因而未被破坏。但是第二次加载时，破坏荷载反而比第一次的荷载小。分析其原因是第一次加载已经对试件的内部应力产生一定的影响，使试件内部产生了残余应力。从位移的大小来看，第一次加载时产生的位移较其它试件的位移大得多，原因是试件的厚度较大，加上模拟材料中含有一定比例的石膏，试件内部湿度较大，弹模较小，因此即使在相同的荷载下，所产生的位移相对会大一些。试件 3 号第二次加载时，还未加到第一次的最大荷载就破坏了，并且位移很小，比 2 号试件的位移还小，从位移的角度来看，作为支座的箱型梁的变形已稳定，再次加载时产生的附加位移很小。理论上试件 3 号的极限荷载应比第一次的最大荷载大，位移也应大于试件 2 号的位移。

④ 从图 5-1、5-2、5-3 的载荷—位移曲线来看，顶板从开始加载到破坏的整个过程是一个非线性过程，即荷载与位移的关系呈非线性关系，整个过程可分为三段。刚开始加载到一定的荷载时，荷载与位移的关系接近线性关系，说明在这一阶段顶板的整体变形处于弹性变形阶段。超过这一值后，顶板进入塑性变形阶段。在荷载达到最大值后，试件的位移继续增加，而荷载逐渐减少，最后达到破坏，这一点从图 5-1 可较明显的看出来。这一过程证明顶板模拟材料的特性接近实际岩石的破坏机理。

从自动测试系统在桩基模拟试验中的应用可以看出，接上本文组建的自动测试系统后，岩溶地区桩基模拟试验的测试完全可以达到试验的要求，主要体现在：对岩溶地区桩基模拟试验所要测试的参数实现了自动化检测；由自动测试系统测试的参数计算出的最大抗弯强度与实测的抗弯强度比较，略为小一些，其原因是实测的抗弯强度取的是从破坏后的试件中切割的小样测量的，由于岩体的尺寸效应，大试样的强度一般比小试样的强度要低。如果去除自动测试系统本身的误差因素和以上的影响因素后，由自动测试系统测试的参数完全能满足我们试验的精度要求。

桩基模拟实验原始数据报表（1#试件）

桩顶载荷 (KN)	桩顶位移 (mm)	顶板载荷 (KN)	顶板位移 (mm)
0	0	0	0
2.659	0.21	3.109	0.237
3.509	0.34	3.959	0.35
4.214	0.462	4.664	0.462
4.685	0.582	5.135	0.565
7.471	1.042	7.921	0.977
10.039	1.275	10.489	1.08
8.52	1.3	8.97	1.157
7.923	1.305	8.373	1.192

桩基模拟实验原始数据报表（3#试件）

桩顶载荷 (KN)	桩顶位移 (mm)	顶板载荷 (KN)	顶板位移 (mm)
0	0	0	0
2.641	0.057	3.091	0.087
10.22	0.265	10.67	0.45
13.096	0.347	13.546	0.595
17.112	0.502	17.562	0.84
19.066	0.582	19.516	0.967
22.865	0.757	23.315	1.212
23.896	0.867	24.346	1.365
23.209	0.88	23.659	1.372
22.901	0.887	23.351	1.375

桩基模拟实验原始数据报表 (2#试件)

桩顶载荷 (KN)	桩顶位移 (mm)	顶板载荷 (KN)	顶板位移 (mm)
0	0	0	0
2.803	0.135	3.253	0.075
6.132	0.322	6.582	0.182
8.068	0.437	8.518	0.245
10.238	0.592	10.688	0.325
10.853	0.625	11.303	0.357
11.939	0.707	12.389	0.387
13.639	0.82	14.089	0.455
14.67	0.9	15.12	0.502
15.376	0.945	15.826	0.542
16.407	1.015	16.857	0.572
17.13	1.042	17.58	0.602
17.746	1.12	18.196	0.64
18.324	1.202	18.774	0.735
19.826	1.315	20.276	0.765
20.025	1.352	20.475	0.787
21.02	1.485	21.47	0.877
22.865	1.657	23.315	1.015
21.436	1.75	21.886	1.077
19.102	1.815	19.552	1.175

桩基模拟实验原始数据报表 (3 ‘试件)

桩顶载荷 (KN)	桩顶位移 (mm)	顶板载荷 (KN)	顶板位移 (mm)
0	0	0	0
4.956	0.352	5.406	0.257
8.194	0.647	8.644	0.447
9.189	0.757	9.639	0.5
9.569	0.832	10.019	0.53
10.075	0.887	10.525	0.572
12.065	1.13	12.515	0.807
12.373	1.185	12.823	0.847
12.753	1.265	13.203	0.912
14.091	1.425	14.541	1.062
14.779	1.537	15.229	1.155
16.208	1.727	16.658	1.327
17.456	1.872	17.906	1.485
18.813	2.07	19.263	1.665
20.531	2.32	20.981	1.892
21.617	2.495	22.067	2.047
23.39	2.755	23.84	2.302
21.002	3.265	21.452	2.777
18.994	3.4	19.444	2.99

第六章 结论及建议

6.1 结论

岩溶地区桩基模拟试验自动测试系统研究是《岩溶发育地区灌注桩应用研究》中的一部分。岩溶发育地区灌注桩应用研究是通过自行设计制造的室内大型物理模型,要求能利用自动测试系统采集和处理数据,从而系统地分析灌注桩的端承力与嵌岩深度和岩溶顶板厚度的关系。但由于岩溶发育地区的地质条件复杂多变,要做到完全的现场模拟是不可能的,因此在考虑一部分主要因素的前提下,暂时不考虑和忽略一些次要的因素,使得模型能尽量地简化。本文根据简化后的桩基模型,研究设计出的一套切实可行的自动测试系统,并取得了如下结论:

(1) 岩溶发育地区灌注桩应用研究在模型桩的研究史还是第一次,本文为此桩基模拟试验提供了一种全新的测试方法。在此测试系统中采用计算机控制,具有很强的逻辑判断、记忆存储和运算处理能力。此测试系统按本文编制好的程序快速、准确地进行操作,可以自动切换测试点和进行巡回检测,整个测试系统从数据的采集到数据的处理,全部实现了自动化,跟传统的桩基测试方法相比有了很大的改进。

(2) 在传统的桩基检测中,一般只能先取得测量数据,再经过人工分析数据,最后得出试验结论。但在本测试系统中,用计算机指挥操作,可以自动校准、自动调整测试点、自动切换量程、自动记录和处理数据,使测试、分析和测试结果的应用融为一体。

(3) 岩溶地区桩基模拟试验自动测试系统研究主要涉及测量参数的确定、采集和处理,测试仪器合理的选择,自动测试系统的组装,自动测试系统的精度分析,自动测试系统软件的编制和调试等问题。

(4) 自动测试系统测试仪器的选择应根据其使用目的、测量准确度、环境条件、被测对象状况和输出信号要求等综合考虑,所选仪器应注意其工作可靠性、长期稳定性、对特性的要求以及对环境的适应能力等。

(5) 自动测试系统精度的分析,应根据各种误差的来源,凡是可避免的影响因素都应尽量消除或减到最小,凡系统误差应进行必要的修正,最后将其无法避免的随机误差进行综合。系统误差是在测量条件改变时按确定规律变化的误差,本文组装的自动测试系统正可以把这种规律存储起来,在测试过程中加以修正。在传统的测试方法中,一般都忽略了长导线和应变计等对系统精度的影响,在本文中对它们的影响进行了必要的修正,使得整个测试系统的精度和准确性得到了一定的提高。

(6) 自动测试系统软件应根据测试参数、最后成果处理等的要求而编制,本文提供的系统软件对用户比较友好,跟传统的测试系统软件相比,实现了面向对象化,能大量地减轻操作人员的劳动强度。

(7) 此自动测试系统通过桩基物理模型的检验,能正常地运行,达到了测试的目的和要求,并且所测参数的精度跟理论计算值相差无几,说明此自动测试系统完全可行。

6.2 建议

(1) 本文所组装的自动测试系统的性能跟采用光纤测试的性能相比,相对来说要差一些,但光纤测试的价格比较贵,在经济条件允许的情况下光纤测试是非常可行的。

(2) 本文所组装的自动测试系统中,数据采集系统和数据处理系统是相互独立的,本测试

系统在数据采集的同时，只能对所采集的数据作一些预处理，而最终的结果处理必须退出数据采集系统，再进入数据处理系统才能进行，这给操作人员带来了不便，建议编写一应用程序使两者能统一起来。

(3) 在本测试系统中没有对加载系统进行控制，而是通过人为的操作，这会使加载和测试不是完全同步，也就是不能进行实时控制，建议利用计算机的实时控制，把加载系统和测试系统统一起来。

致谢

两年多来，导师彭振斌教授严谨的治学作风，认真负责的工作态度以及对学生精心的指导，无私的帮助和亲切的关怀，使我受益非浅，在论文的写作过程中，从论文提纲的拟定，到最后论文定稿他都给予了耐心细致的指导和帮助，并对论文进行了认真的审阅，提出了宝贵的意见，为本文能顺利地完成任务花费了不少时间和精力。值此成文之际特向导师表示衷心的感谢，并致以最崇高的敬意！

在两年多学习期间，得到了中南大学资环建院勘基所隆威教授、张可能教授等所有老师的关心和指导。

本人在作硕士论文过程中，隆威教授提出了许多宝贵的建议，以及得到了师兄刘铁雄博士和安伟刚硕士的协作和帮助。

在此向所有关心、指导及帮助过我的老师、同学、好友们一并表示衷心的感谢！

参考文献

- [1] 刘金励, 桩基工程技术, 北京: 中国建材工业出版社, 1996
- [2] 黄强, 桩基工程若干热点技术问题, 北京: 中国建材工业出版社, 1996
- [3] 黄强, 陈凡, 桩基工程检测技术的应用及进展, 岩土工程师, 1993, 3
- [4] 侯学渊, 孔清华等, 桩基技术新进展学术讨论会论文集, 1991
- [5] 徐攸在, 刘兴满, 桩的动测新技术, 北京: 中国建筑工业出版社, 1989
- [6] 肖明贵, 岩溶地区大直径人工挖孔桩桩端持力层检验, 桂林工学院学报, 1997, 1
- [7] 四川省公路勘察设计院试验室, 嵌岩灌注桩的轴向承载力, 岩土工程学报, 1984, 2
- [8] 史佩栋, 梁晋渝, 嵌岩桩竖向承载力的研究, 岩土工程学报, 1994, 4
- [9] 王成华, 单桩竖向静载试验存在的若干理论与实践问题, 岩土工程学报, 1998, 6
- [10] 江礼茂等, 一个以波动理论为基础计算单桩承载力的计算机程序, 岩土工程学报, 1990, 4
- [11] 曾辉等, 岩土应力传感器的设计和使用原则, 岩土工程学报, 1994, 1
- [12] 柴敬等, 相似材料模型实验中围岩垂直应力测试的实验结果, 岩土工程学报, 2000, 2
- [13] 韩晓林等, 桩基承载力检测的准静载灰色方法, 岩土工程学报, 2000, 1
- [14] 《桩基工程手册》编写委员会, 桩基工程手册, 中国建筑工业出版社, 1995
- [15] 林韵梅编著, 实验岩石力学—模拟研究, 煤炭工业出版社, 1984
- [16] 王成华, 对桩基模型试验及桩承载力问题的讨论, 岩土工程学报, 1993, 4
- [17] 修朝英, 李大展, 单桩垂直静载试验 p-s 曲线的数学描述和极限荷载的预测, 岩土工程学报, 1988, 6
- [18] [美]G.M Sabnis 等: 结构模型和试验技术, 中国铁道出版社, 1989
- [19] 陈兴华等, 脆性材料结构模型试验, 水利电力出版社, 1984
- [20] 曾辉, 传感器与岩土介质相互作用研究综述, 防护工程, 1990, 2
- [21] 第二冶金建设公司建筑研究所技术情报室, 国外静土压力盒理论与实验研究综述, 1977
- [22] 李鸿昌, 矿山压力的相似模拟实验, 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998
- [23] Brandl H, Bearing Capacity of Piers and Piles with Large Diameters, In: Proc 11th Intern Conf Soil Mech Found Engg. San Francisco, 1985, 3:1525~1530
- [24] Horrath RG, Kenney T C. Shaft Resistance of Rock-socketed Drilled Piers. In: Proc Sym Deep Found. ASCE National Convention, Atlanta, USA, 1979. 182~214
- [25] R. Radhakrishnan, Chun F. Leung. Load Transfer Behavior of Rock-socketed Piles. Journal Geotechnical Engineering, ASCE, 1989, 115(6):755~768
- [26] Pells, P. J. Nand Turner, R. M. Elastic solutions for the design and analysis of rock-socketed piles. Can. Geotech. J. 1979, 16:481~487
- [27] Rowe, R. K., and Armitage, H. H. A design method for drilled piers in soft rock. Can. Geotech. J. 1987, 24:126~142
- [28] 姚志石, 涂时亮等, 单片微型计算机实用子程序, 上海: 复旦大学出版社, 1986
- [29] 侯博文, 单片微型计算机原理及应用, 北京: 机械工业出版社, 1987
- [30] 严隽薇, 严隽永, 计算机实时控制软件设计导论, 北京: 清华大学出版社, 1990
- [31] 郑城荣等, DELPHI 运行时间库 RTL 和组件库 VCL 技术参考, 北京: 人民邮电出版社, 1999
- [32] 李永正, 专家控制技术与智能控制理论的发展, 自动化仪表, 1997, 18 (7), 1-7
- [33] 梁志国, 线性模拟量采集系统准确度的一种评价方法, 航空计测技术, 1996, 16 (5), 23-25

- [34] 赵伟, 微机化仪器及其自动测试系统, 电测与仪表, 1996, 33 (3), 3-8
- [35] 郑叔芳, 关于测量误差及其分布参数, 宇航计测技术, 1996, 16 (2), 56-58
- [36] 李则祥, 电阻应变计悬臂梁传感器在力矩测量中的应用, 传感器技术, 1997, 16 (3), 52-53
- [37] 李瑞麟, 自动测试系统中用户软件的设计, 电子测量与仪器学报, 1997, 11 (2), 29-32
- [38] 潘承武, 用 8098 单片机实现高分辨率 A/D 转换, 电测与仪表, 1996, 33 (11), 17-19
- [39] 吴白云, 内阻测量中的误差分析及改进, 计量与测试技术, 1997, 24 (2), 29-30
- [40] 费业泰, 精密测试及仪器的误差修正技术, 宇航计测技术, 1996, 16 (4, 5), 66-70
- [41] 石群英, 专家系统开发工具的现状 & 展望, 自动化仪表, 1997, 18 (4), 1-3
- [42] 林福华, 一种自动化 PCB 在线测试系统, 电子测量技术, 1997, 23 (1), 28-32
- [43] 一种基于软挂钩串行通信的数据采集系统的实现, 国外电子测量技术, 1998 (3), 34-37
- [44] 李友成, 单片机在动态测试中的应用, 测控技术, 1998, 17 (4), 52-53
- [45] Stein P. K, Sixty years of bonded resistance strain gage, M & C, 1996, 30(2), 131-139
- [46] Vujicic, Predetermination of the quantization error in digital measurement system, IEEE Trans. Instrum, Meas, 1997, 46(2), 439-441
- [47] Gajda, Parametric optimisation of measuring systems according to the joint error criterion, IMTC/96-IMEKO TC-7, 1996, 6
- [48] Kondrator, V. T, The systematic error correction in measurement transduction of the physical quantities x , x^2 and x^3 , IMTC/96-IMEKO TC-7, 1996, 6
- [49] Micheleni, R. C, Computer aided testing and confirmation for strain measurement in instrumentation, Measurement, 1996, 5
- [50] Sobolev, V. K, Metrological automatic support of measurement results in intelligent measurement, Measurement, 1996, 17(3), 151-159
- [51] Liu, L. S, Microcomputer-aided liquid level automatic monitoring and measuring system, PROC of SPIE, 1993, 10
- [52] Benjaminson, A, Brige circuits enhance crystal-oscillator stability, Mic & RF, 1995, 34(11)
- [53] 刘金励, 桩基工程检测技术, 北京: 中国建材工业出版社, 1993
- [54] 施尚伟, 微机在应变电测技术中的应用, 重庆交通学院院报, 1997, 2
- [55] 张如一等, 试验应力分析, 北京: 机械工业出版社, 1981
- [56] 林韵梅, 实验岩石力学, 北京: 冶金工业出版社, 1986
- [57] 叶孝佑, 多通道电感位移传感器数据采集装置, 计量技术, 1994, 4
- [58] 蔡明伦, 传感器电桥电路的非线性修正, 青岛海洋大学学报, 1995, 25 (4), 523-526
- [59] 袁希光, 传感器技术手册, 北京: 国防工业出版社, 1986
- [60] 马良埕, 应变电测与传感技术, 北京: 中国计量出版社, 1993
- [61] 史丽萍, 自动测试系统的现状与发展趋势, 煤矿自动化, 1996, 1
- [62] 陈皓等, 电子测试仪器的发展趋势, 计算机自动测量与控制, 1992, 2
- [63] 王立吉, “在线测量”的国内外现状与发展趋势, 中国计量学院学报, 1993, 6
- [64] 浅谈基于 PC 的测试系统的主要发展趋势, 国外电子测量技术, 1998, 6
- [65] 安根旺, 应变电测技术中的误差分析及确定方法, 兰州铁道学院学报, 1994, 3
- [66] 王智军, 利用 DELPHI 制作不规则表格处理数据, 计算机系统应用, 1999, 3
- [67] 陆挂明, DELPHI 在监控系统中的应用, 微型机与应用, 1999, 6
- [68] 刘允致, 利用 DELPHI 进行非 PASCAL 语言应用程序的界面设计, 计算机应用研究, 2000, 5
- [69] 李永敏, 数字化测试技术, 北京: 航空工业出版社, 1987
- [70] 黄文云, 微机在应变测量中的应用, 电子与自动化, 1994, 1
- [71] 贾宏宇, 也谈基于 OWL 的 WINDOWS 事件驱动串行通信技术, 工业控制计算机, 1998, 1
- [72] 孔丽君, 在 WINDOWS 环境下实现串行口的实时检测, 北京工业大学学报, 1999, 25 (1)

- [73] 吴辰文, 实时串行通信的设计及实现, 计算机工程, 1998, 24 (5), 56-59
- [74] 甘涛等, 自动测试系统的组建及 DELPHI 的应用, 机械与电子, 1999, 2
- [75] 宋建云, “DELPHI FOR WINDOWS 大全”, 北京: 电子工业出版社, 1996
- [76] Inprise Corporation, Delphi5 标准教程, 北京: 清华大学出版社, 1999
- [77] 新智工作室, Delphi5 基础与提高, 北京: 电子工业出版社, 2000
- [78] 何熙文, 单片微型计算机原理与应用, 大连: 大连理工大学出版社, 1990
- [79] 阮德生, 自动测试技术与计算机仪器系统设计, 西安: 西安电子科技大学出版社, 1997
- [80] 徐爱钧, 智能化测量控制仪表原理与设计, 北京: 北京航空航天大学出版社, 1996
- [81] 古天祥, 单片微型计算机, 成都: 成都电讯工程学院出版社, 1989
- [82] 孙续, 自动测试系统与可编程仪器, 北京: 电子工业出版社, 1994
- [83] 张世箕, 自动测试系统, 成都: 电子科技大学出版社, 1994
- [84] 中国计算机自动测量与控制技术协会编译, VXI 总线测试系统: 自动测试领域最新进展, 北京: 航空出版社, 1992
- [85] 钟继贵, 误差理论与数据处理, 北京: 水利电力出版社, 1993
- [86] 李俱全, 测量误差及数据处理技术规范解说, 北京: 中国计量出版社, 1993
- [87] 袁永根, 过程系统数据校正技术, 北京: 中国石化出版社, 1996
- [88] 石金峰, 近代误差理论与数据处理, 北京: 煤炭工业出版社, 1994
- [89] 赵玉珠, 测量仪表与自动化, 东营: 石油大学出版社, 1998
- [90] 顾亚平, 自动测试软件, 北京: 国防工业出版社, 1989
- [91] 孙家琪, 自动测试系统, 北京: 北京机械工业出版社, 1990
- [92] 刘树勋, 自动测试系统原理及应用, 成都: 四川科学技术出版社, 1986
- [93] 刘家松, 自动测试仪器及系统, 北京: 国防工业出版社, 1980
- [94] 施文康, 测试技术, 上海: 上海交通大学出版社, 1996
- [95] 顾孝烈, 测量电算程序设计, 东营: 石油大学出版社, 1992