

# 1 概要篇——840D 数控系统总体介绍

天地万物，皆定位于时空，数控即是用数字、数理来理解和控制时间、空间的艺术。时间常用周期、频率来描述，空间常用位置、角度来描述。由一元格物为时空二元，以时空组成坐标系框架，进而在此基础上描写出点、线、面、体而演绎成各种对象，研究对象本身的属性，进而研究对象间的关系，将以上这种种组环成局就形成一整套数控理论和方法。

数控系统是数字控制系统（Numerical Control System）的简称，是一种根据控制器存储的控制程序，执行部分或全部数值控制功能，并配有接口电路和伺服驱动装置的专用计算机系统，通过利用数字、文字和符号组成的数字指令来实现一台或多台机械设备的动作控制。它所控制的通常是位置、角度、速度等机械量和开关量。

目前世界上的数控系统种类繁多，形式各异，组成结构上都有各自的特点。这些结构特点来源于系统初始设计的基本要求及硬件和软件的工程设计思路。对于不同的生产厂家来说，基于历史发展因素以及各自因地制宜的复杂因素的影响，在设计思想上也可能各有千秋。现在市场上占有率较高的是日本 Fanuc 和德国 Siemens 系统。然而，无论哪种系统，它们的基本原理和构成是十分相似的。

20 世纪 90 年代开始，由于 PC 结构计算机的广泛应用，PC 构架下计算机 CPU 及外围存储、显示、通信技术的高速进步，制造成本的大幅降低，PC 构架数控系统日趋成为主流的数控系统结构体系。PC 数控系统的发展，形成了“NCK+PC”过渡型结构，即保留传统 NC 硬件结构，仅将 PC 作为 HMI（人机界面接口）来使用，代表性产品包括发那科的 160i、180i、310i、840D 等。还有一种是将数控功能集中以运动控制卡的形式实现，通过扩增 NC 控制板卡（如基于 DSP 的运动控制卡等）来发展 PC 数控系统，典型代表有美国泰通（DELTA TAU）公司用 PMAC 多轴运动控制卡构造的 PMAC-NC 系统。另一种更具革命性的结构是全部采用 PC 平台的软硬件资源，仅增加与伺服驱动及 I/O 设备通信所必需的现场总线接口，从而实现非常简洁的硬件体系结构。

## 1.1 三元八类思想概述

本书针对的是西门子 840D sl 系统，840D sl 系统架构既严谨又灵活，适用性很广，功能很多。正因为如此，初接触时使人感到神秘，刚入门时使人感到非常方便，但有时却无从下手，有所领悟时又感到博大精深，最终顿悟后又感到万变不离其宗。而相关的参考文档又卷帙浩繁，汗牛充栋。初学者若没有整理出一根主线大纲，很难分析透彻并掌握其精要。

任何大系统都可分为表象和本质两部分，数控系统亦是如此。因此，从事和研究数控的人也大致分为两大类：制造商和用户。对于内核的开发是原始设备制造商的主要任务，对于基本程序架构和特殊应用功能的开发是普通制造商的主要任务，而对于外部的简单操作应用则会交给普通用户去做。本书的定位是站在制造商的角度来探讨基本程序架构和某些特殊应用功能的实现过程和方法，而非只是站在普通用户的角度来学习如何操作和掌握数控系统。

一般情况会将 840D 系统分为三大部件：NCK、PLC、HMI，如图 1-1 所示。

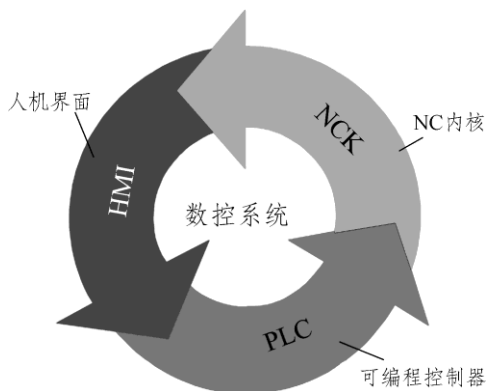


图 1-1 数控架构图

图 1-1 所示数控架构并不十分完善，它没有包含重要部件之一的驱动系统 DRV，为表现更多细节和接口，参照数控本体的工程设计，总结出更加完善的数控系统架构如图 1-2 所示。

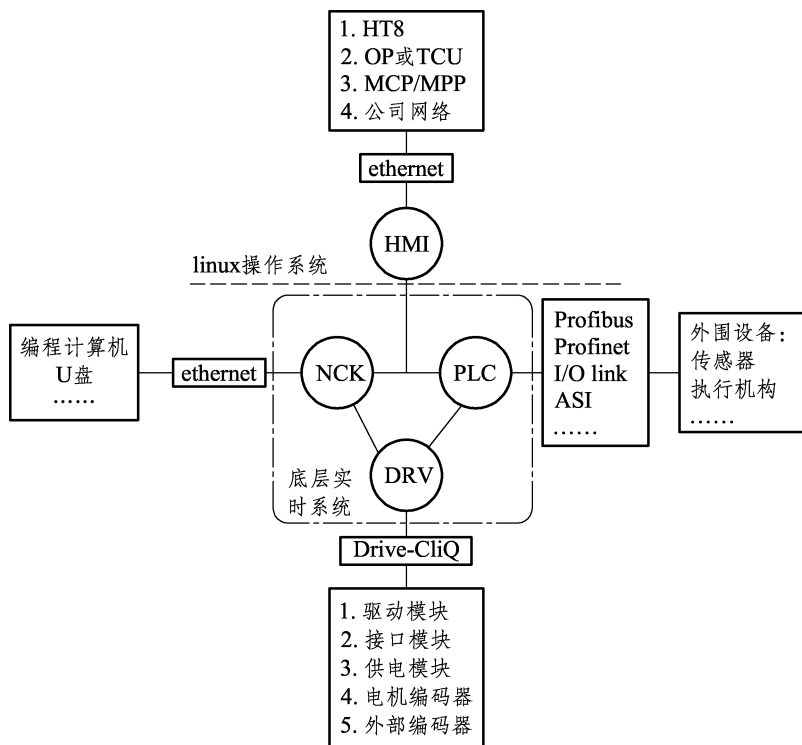


图 1-2 数控系统架构总图

由图 1-2 可知，840D sl 系统可分成三大构件：NCK+PLC（控制内核）、DRV（驱动模块）、HMI（人机界面接口）。其中，NCK+PLC 为数控系统特有的控制组合。如果在纯粹使用 PLC 的工业自动化控制领域，此控制内核可用 PLC 来完全替代。如果采用单片机或工控机实现，此控制内核可用单片机或工控机来替代。其本质都是做算法逻辑控制。数控中常称 NCK+PLC 的结构为 NCU（NC 单元）。PLC 连接外围设备以及内部模块采用的接口是多种多样的，常见的

有 Profibus, Profinet, I/O link, AS-I 等数据总线。NCK 的主要任务和目的就是实现控制和逻辑运算。

DRV 在 840D sl 系列中就特指 S120 驱动组件, 它采用 Drive-CliQ 总线连接, 其本质是以太网线+Profibus 的组合。驱动部件的主要任务和目的就是实现伺服电机的运动。

NCK+PCL+DRV 共同组成了底层的实时系统。

位于其上的 HMI 可以类比于其他领域俗称的上位机系统, 数控的 HMI 可以连接多种多样的操作和显示单元。840D sl 系统主要使用以太网进行通信, 其 X130 口可作为系统和外界工厂网络的通信端口。HMI 的主要任务和目的就是完成人机对话。

图 1-2 所示只是表象系统, 表象系统给人的直观印象就是这三大构件, 但并不能反映更加深层的共性内涵。我们注意到 NCK 和 PLC 都含有共性就是 C (control, 控制), 由此可得到一个分类——控制组件。而由 DRV 驱动伺服电机以及 NCK 控制的外围部件的相关运动, 可以归纳得到另一个分类——运动组件 M (Motion)。再由 HMI (人机界面接口) 联想到 HMI 同 NCK 接口, NCK 同 DRV 接口, NCK 和 PLC 的接口, 得出第三个共性分类——接口组件 I (Interface)。因此我们得到了一个具有普遍意义的共性模型, 即三元八类划分中的第一个模型——三元模型 (C-I-M), 如图 1-3 所示。

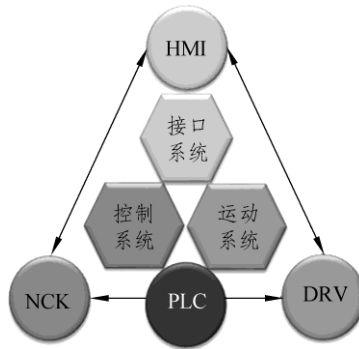


图 1-3 三元模型 (C-I-M)

三大系统: 控制系统、接口系统、运动系统, 这就是数控的“本体——体”, 而在具体应用实践中, 往往用户或制造商只需关注实现手段, 即数控的软件和硬件应用层, 相应表现出的应用可分为三大构件即 NCK+PLC 部分、DRV 部分、HMI 部分, 这就是数控的“应用部分——用”。体用同源, 这两种划分方式都是源于数控本身, 源头一样, 但是表现却不一样。我们日常接触的都是表面的应用层, 实际却是在和核心的体打交道。这个三元的划分可以说是数控系统的本体论。

三元的相通之处有很多, 例如, Step 7 编程软件的 PLC 程序中有 FB, WinCC flexible hmi 程序中有 faceplate 模板, PLC 中有全局符号表, NCK 中有 DEF 全局定义文件, HMI 中有全局变量, 驱动中也有全局参数。三元互相之间存在对应关系。

基于三大系统的本体论, 针对具体的应用层面, 再将数控本体三大系统细分为 8 个子类, 如图 1-4 所示, 按照功能的不同将数控的各种概念、各种应用和解决方案归入这 8 个子类中的一个或几个, 而这八个类又隶属于三大系统, 这样就有了一个宏观架构, 本书的各个子章节也都围绕这三大系统和八个子类来阐述。

和编写程序一样，首先要定义全局变量和控制架构，然后再谈具体实现。综观全书，三大组成系统在内表现为控制、接口、运动，在外应用表现为 NCK+PLC、DRV、HMI。

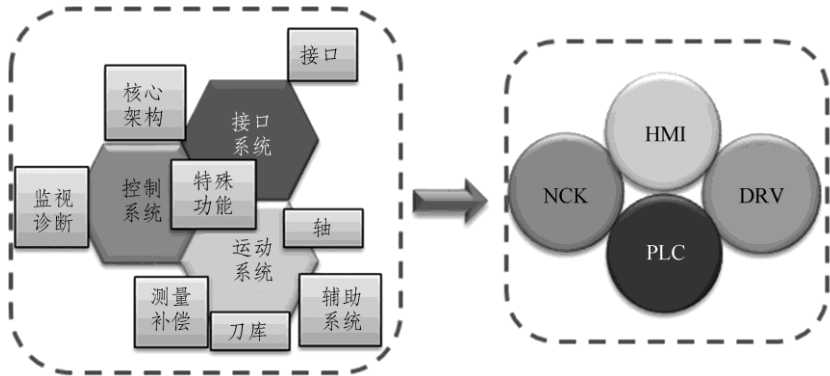


图 1-4 八类模型

### 1. 第 1 类为核心架构类

核心架构类包括主程序，子程序结构和相互调用，通道程序调用和协调，异步程序，同步指令，变量类（如程序运行的变量、通道变量、用户自定义变量等）、控制类和逻辑类指令，安全集成功能等。核心架构类是整个系统的核心龙骨。

### 2. 第 2 类为监视诊断类

监视诊断类包括报警、警告、信息显示、工作区域限制、轴速度限制和监控、软硬限位功能、诊断图等。

### 3. 第 3 类为信号通信接口类

信号通信接口类包括 NCK 与 PLC 交互信号、驱动信号、编码器信号、参考点信号、与外围设备交互等。

### 4. 第 4 类为轴容器类

轴容器类包括进给轴类、主轴类、通道几何轴等多重属性分析，轴变换，轴变量类等。其要点在于关注轴的配置、轴的变换、关注速度控制、位置控制、基本插补（如圆弧直线等）。

### 5. 第 5 类为辅助系统类

辅助系统是为了完成运动任务所必备的协助系统，如运动部件的润滑系统、气动系统、液压系统等。

### 6. 第 6 类为刀库管理类

刀库管理是一个很重要的内容，刀库并非每台机床都具有，大部分轴类加工因为刀具简单（一般就是砂轮、车刀），所以不需要刀库管理，但是特殊的轴类加工可能会碰到特殊的刀库设计如车床或多刀管理等，而大部分箱体类零件加工因为刀具种类很多，一般为铣床加工中心，所以必须要进行刀库管理。最后可将刀库管理的模式引申为机械手的夹爪库管理，甚至夹具库管理。

### 7. 第 7 类为测量与补偿类

测量与补偿类包括测量功能、补偿功能等。

## 8. 第 8 类为特殊功能类

特殊功能类包括特殊轴转换、轴耦合、特殊轨迹等，主要是针对某个具体应用领域解决某种特殊任务，完成特殊功能等。如多项式插补、样条曲线、表格插补、电子齿轮等，也包含诸如切线控制等特殊轨迹的实现。其要点在于关注运动的轨迹和变换。

顺说八类划分：

这 8 个子类有着相对固定的演变顺序，首先应由核心架构类定出基本框架，进而系统需要实时监控、维修诊断功能，以便及时反馈和掌握当前的各种状态，而后又扩展出和外围相关的各种通信接口，如与 PLC 的接口、与 HMI 的接口，建立起外围的信号系统和驱动系统，然后才定义运动执行器，首先建立相关的几何模型和轴容器模型，进而计算出相关的运动轨迹，到此涉及具体实现过程，机床当然是采用主轴加刀具为其执行器，故而关注刀具管理，而其他领域，如装配领域将拧紧枪、夹爪作为执行器，此时可将各种特殊工具看做刀具来进行管理。在此运动加工过程中需要辅助系统辅助配合。对于工艺过程和运动状态，需要实时测量和补偿，因此测量与补偿应运而生，至此，一台机床初步成型，但是涉及特殊领域加工中工艺过程，如磨床磨削补偿、摆动控制、铣床五轴联动、曲线加工等，必须开发相应特殊工艺功能来配合应用。因此，诞生了特殊工艺类。到此为止，制造商的任务已经基本完成，接下来用户登场，进行产品的操作和使用。

所有 840D 的设计和应用均离不开这 8 个类，任何一个任务都是这几个方面中的一个或者多个方面综合使用。举一例子，例如，优化轴主要要点在于使得速度更快，位置更精确，那么它一定属于轴类，但是，光靠轴类功能不够，还需要监视诊断轴的运行状态，分析伯德图，这样就用了监视诊断功能，而在优化的具体过程中，前馈补偿和加速度补偿往往要分别进行，做速度环和位置环优化时一定要去掉这两种功能，因此又涉及补偿类。轴的优化过程可作为西门子数控系统的典型应用和分析案例，其他有关运动控制的问题也可举一反三。

再举一例，例如，数控辅助功能指令，它涉及面其实很广。M00、M02、M30 这几个指令都是作程序结束控制的，因此归为程序类；而 M03、M04、M05 这几个又属于主轴控制，可归为轴类；而有些功能如 M06 换刀，可归为刀具管理类；H 指令用于记忆功能，可完成程序段记忆，这时候属于程序类，而 H 指令用于速度值分配，又属于轴类。但总的来讲，辅助功能指令都属于辅助系统类，目的是为了辅助运动过程的完成。基于这些特性，辅助系统起着沟通神经系统（核心程序架构）和运动系统（轴和轨迹运动）的作用。

由此可见，若不进行深入的分门解析，就寻不到要点，没有纲要，就会乱用、误用，开放性的西门子数控虽然灵活，可带来方便，但也会带来危险，若不小心谨慎，就会陷入各种杂乱信息的泥潭。

## 1.2 840D sl 硬件总体介绍和概览

本书介绍的 840D sl 系统是典型的 NCK+PLC 的架构方式。一般来说，840D sl 数控系统大量用于机床行业，是各类数控机床完成金属切削加工、装配制造的核心控制部件。

840D 数控系统共分为两个系列：powerline 与 solutionline。目前 powerline 近乎停产，以后将彻底以 solutionline 为主，所以本书内容将重点针对 solutionline 的设计应用。从 840D 的硬件构成来看，以 NCU 主控制器为核心部件，简化忽略掉一些次要的外围设备，可以将一台机床的

数控系统抽象为如图 1-5 所示的模型。

其中，840D sl 的 NCK (NC Real-time kernel) +PLC 控制器集成在一起，称为 NCU。它是西门子数控实时操作系统的核心，就好比我们的计算机用的是 Windows 7 操作系统一样。NCU 早期时有两个版本：① NC (Numerical Control)：代表旧版的、最初的数控技术；② CNC (Computerized Numerical Control)：计算机数控技术新版，数控的首选形式。

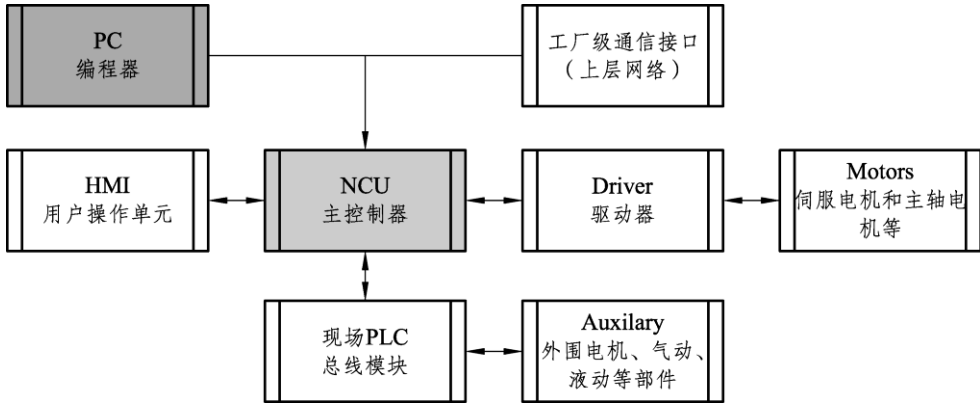


图 1-5 数控机床的抽象模型

PLC 主要用来控制外围设备，HMI 操作单元给用户良好友善的操作界面，驱动器用来控制各种伺服电机和数控主轴。编程器主要是指个人的计算机，用来和控制器通信完成设计和调试过程。

840D 采用 Siemens S7-300 的工作站，故而 PLC 程序基于 S7-300 架构，NC 加工程序是符合国际标准的 G 代码，为了便于高级应用和参数化编程，其高级编程的语法格式近于中高级编程语言如 C 和 Basic。840D 的用户界面可以采用多种方式实现，最常用的有扩展接口 Easyscreen，Transline 即 HMI-pro（汽车行业采用），OA 二次开发所使用的 VC++、Qt-designer 等。

### 1.2.1 硬件大致介绍

一台 840D sl 系统最多支持控制 31 根轴、10 个通道，如图 1-6 所示，可以看出，基本分成两个系列 PCU 和 TCU。PCU 中安装的是 HMI-advanced 界面系统，TCU 安装的是 Operator 界面系统，相应地，PCU 可以支持 WinCC flexible、Easyscreen、OA 等几种开发方式，而 TCU 系列就不包含 WinCC flexible 开发方式。PCU 中可以安装普通的.exe 软件，因为运行的系统是基于 Win XP 的，TCU 就不能运行.exe 文件，因为系统是基于 Linux 的，只能运行.so 文件等 Linux 系统支持的文件。其他的组件如手柄操作单元、电机编码器等就不一一介绍，详见西门子样本手册。

在此提示，有关西门子选型工具的主要是两个：一个是 TIA selector，另一个是 SINAMICS Sizer。

针对数控系统中部件选型主要使用 Sizer 来进行，Sizer 可对 SINAMICS、MICROMASTER 4、DYNAVERT T、SIMATIC ET 200S/pro FC 等驱动系统、电机起动器以及 SINUMERIK solution line、SIMOTION 和 SIMATIC Technology 等控制系统进行设计，并对驱动应用所需的组件进行规格设计、组态和选型。Sizer 可指导用户完成所有设计步骤：从材料供应开始，然后是电机设计，最后是驱动器组件的设计。Sizer 软件才是数控驱动设计的核心，但因篇幅所限，此书并

不对其详解，只有通过手工计算或是通过此类选型设计软件进行大量分析计算后的提出设计方案才是可行的，否则不能称为设计，只能是仿造。

使用 Sizer 进行硬件选型和设计具有以下优点：

(1) 可以非常快速、方便地进行驱动系统的设计；

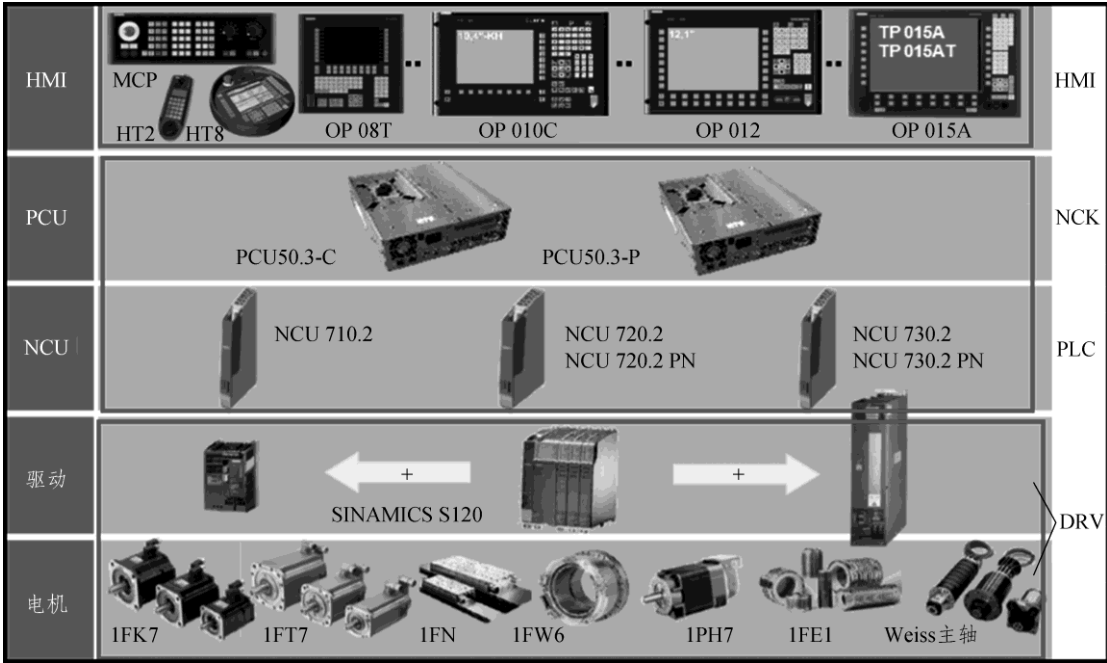


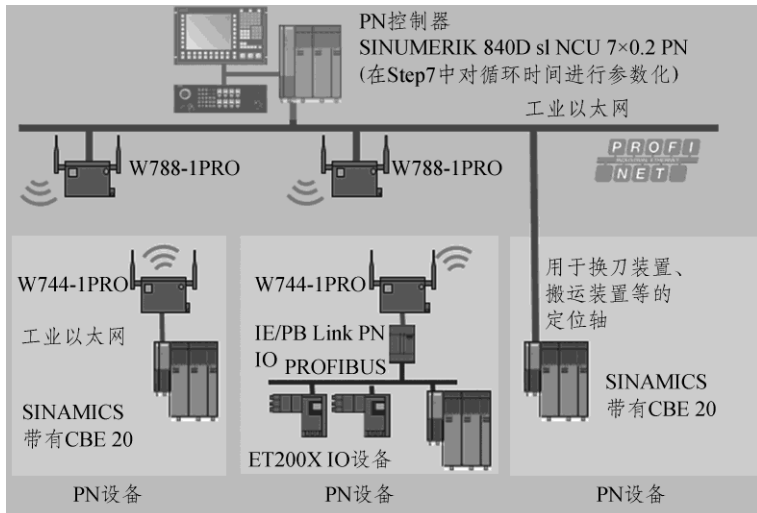
图 1-6 数控硬件分类图

(2) 使用全局驱动设计可进行各种电机规格设计；

(3) 从简单选型和机械系统设计，直至选择面向应用的驱动和控制解决方案；

(4) 高一一致性和可用性直观地引导完成整个工作流：对基本驱动器直至伺服驱动器进行相同地处理，有选择地进行快速优化。SINAMICS Sizer 现在的版本为 V3.4。

此处略提有关未来总线的应用，传统的西门子数控一般大量采用 Profibus 总线和 Asi 总线等，但是未来基本会全部采用无线以太网或者 Profinet 总线加扩展 IO link，如图 1-7 所示，几乎所有的设备在未来均可通过无线总线连接，甚至连能量也可以通过无线来传递，未来可以使用无线技术输送大功率的能量。



灵活使用远程IO或定位轴，也可使用I-WLAN

图 1-7 无线以太网和 Profinet

总线应用是系统通信的一个重中之重，关系整个系统的通信架构，随着智能化、快速化处理大量数据的要求，Profibus 逐渐已经不适合未来的要求，但是本书仍然要以基本的 Profibus-DP 站组态应用为主，简要介绍一些 Profinet 的应用。

### 1.2.2 接口在硬件中的体现

从图 1-8 中可以看出，NCK 同 PLC 之间接口主要是 DPR 和 VDI 信号，NCK 同 DRV 驱动之间主要是 Drive CLiQ 总线接口，外部编程器主要通过 CP 走 EtherNet 以太网访问数控。

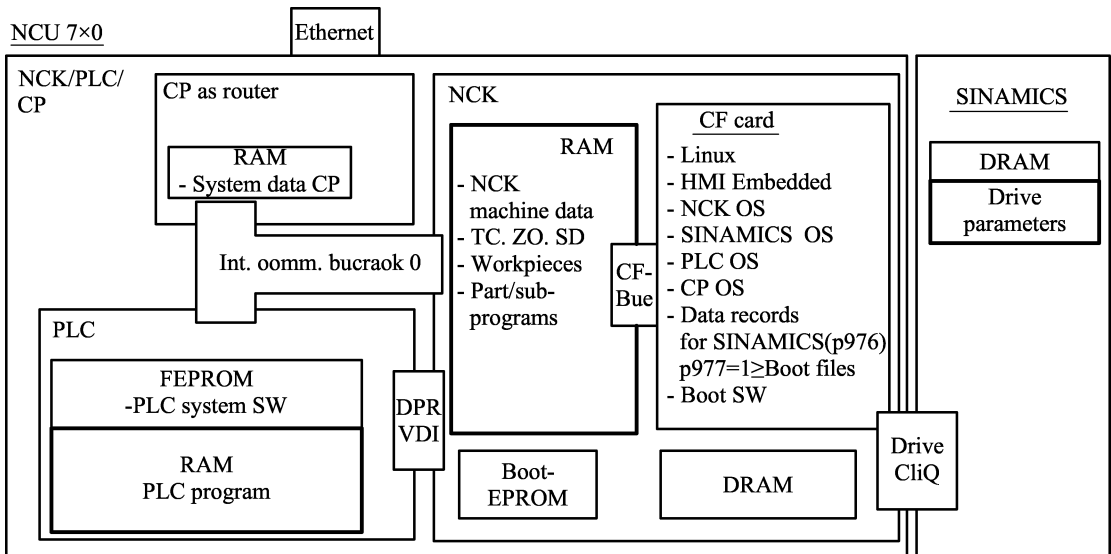


图 1-8 数控系统接口总体架构图

## 1.3 840D sl 软件总体介绍和概览

本书侧重于西门子 840D 数控软件设计和编程应用，作为制造商和设计人员，首先应了解



840D sl 数控的软件总体框架，其次应该掌握常用的数控应用软件。

按照前述的三元八类思想，可以大致作出一个软件总体框架图，如图 1-9 所示，分为两大部分，左边是 HMI 和网络接口，右边为 NCK+PLC 和驱动，左边运行于 Linux 操作系统平台之上，右边是内部的底层实时系统。两个部分依靠内部的软总线连接起来。因此，我们使用编程器计算机连接 CP 以太网端口就可以访问各个子系统。

HMI 与 NCK、PLC 和驱动器之间的通信是通过软总线（Softbus）实现的，该总线的功能相当于 PLC 的通信总线。软总线使用的是 S7 通信协议。既然协议相同，可以推测到想到使用共性的数据结构变量就可以访问这三者（NCK，PLC，DRV）。如图 1-10 所示，反映了四相之间的接口和相关的编程关系。

工欲善其事，必先利其器。随着时代变迁技术发展，很多工具都已被淘汰不再适用，如串口线、专用编程器、MPI 总线等，虽然这些目前可能会继续保留，但是将来必然会被取代。作为机床制造商或客户工厂调试维修人员，了解了基本的软件框架后，就有必要安装与西门子 840D sl 数控系统相关的各种软件。关于数控的软件有很多，也可大致可分为几类：关于 PLC 的、关于 HMI 的、关于驱动通信调试的等。常用的重要软件总结如下：

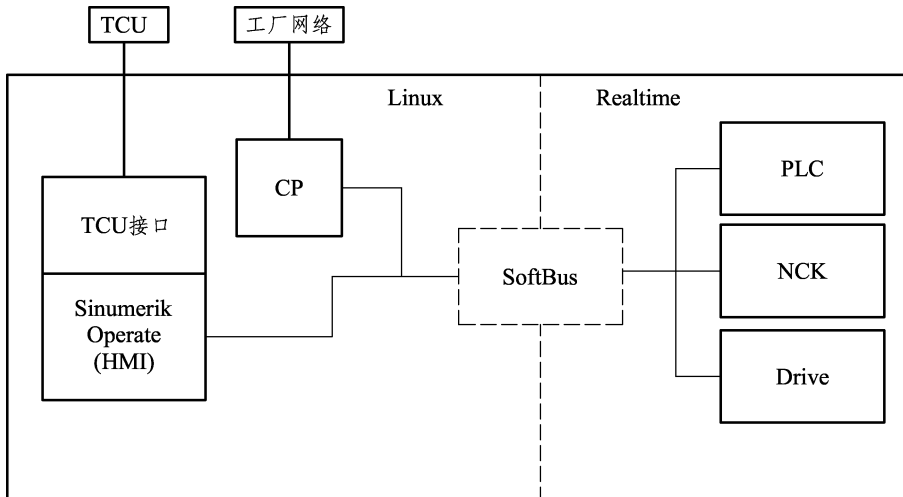


图 1-9 基于 Linux 系统的总体软件架构

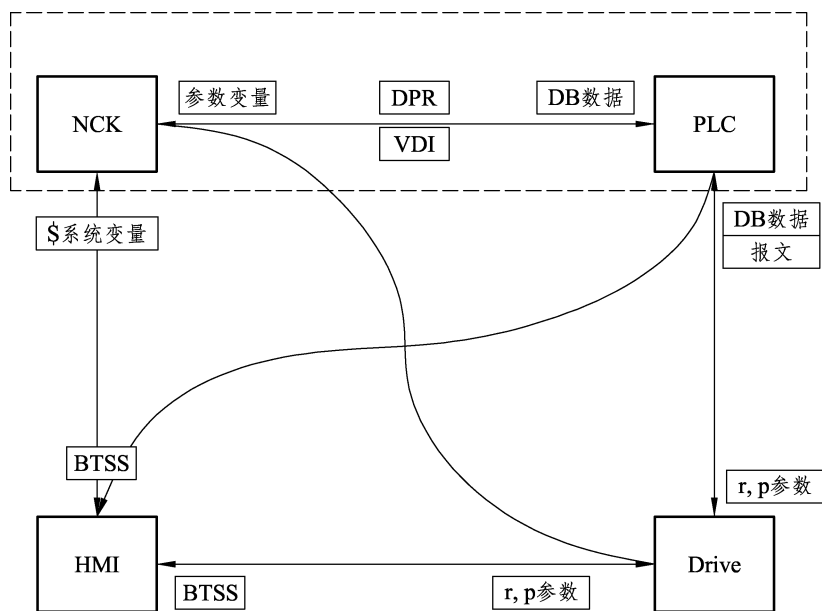


图 1-10 四相接口关系图

### 1.3.1 HMI-Advanced for PC/PG (IBN) —— 基于 Windows 系统的操作界面

#### 1. 概述

HMI-Advanced for PC/PG (IBN) 软件为西门子开发，分为 PC 运行版和 MMC 运行版。MMC 运行版可以理解为就是 840D 的系统操作软件光盘，一般由西门子在交货时安装，或者由机床制造商在调试初期安装到系统中，以前的 powerline 系统中，当硬盘分好区后，就可以通过 U 盘或光盘安装 HMI-Advanced 软件平台。在 solutionline 系统中，如果使用 PCU 架构，可以直接安装 HMI-Advanced；如果使用 TCU 架构，则不能安装 HMI-Advanced，只能安装 Operate 版本，因此相关的调试工作例如配置电机，优化电机不能直接在低版本的 Operate 平台上进行优化（V4.7 支持直接优化，V4.7 以上版本才支持优化功能）。因此，在 solutionline 相关调试过程中，需在

个人计算机一侧安装 HMI-Advanced for PC/PG，主要用于调试驱动、配置电机模块、优化电机、及测试 PVsafety 等。另外，IBN tool 与此软件类似，为其简化版只包含调试功能。

## 2. 应用

(1) 安装完成 HMI-Advanced 后，桌面上会出现如图 1-11 所示文件夹，双击打开 NCU Connection Wizard。

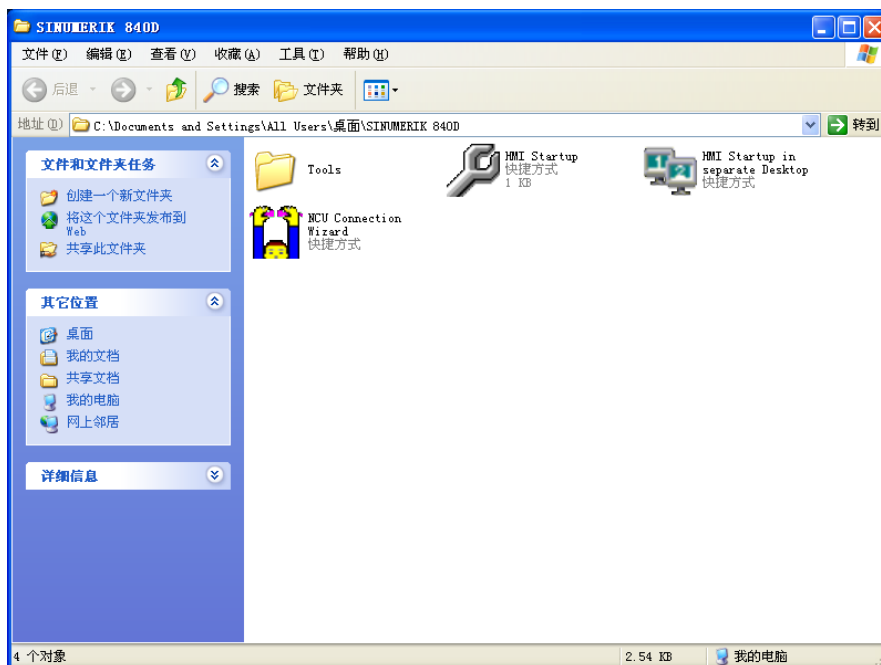


图 1-11 HMI-Advanced 配置第 1 步

(2) 设置和 NCU 的连接方式如图 1-12 所示，选择 840D solutionline 数控类型。

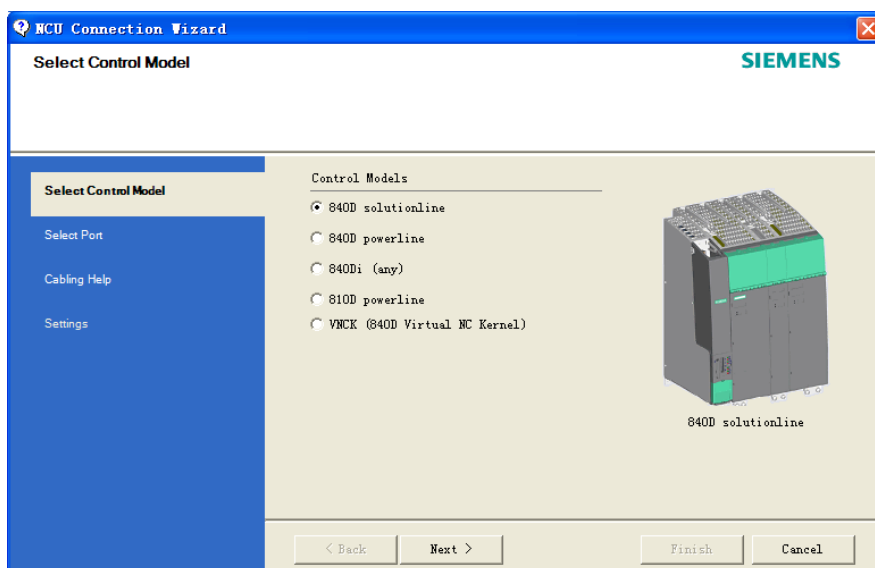


图 1-12 HMI-Advanced 配置第 2 步

(3) 选择网络接口，如图 1-13 所示，一般可选择 X120 接口，如果连入工厂网络，则设置连接到 X130 接口。

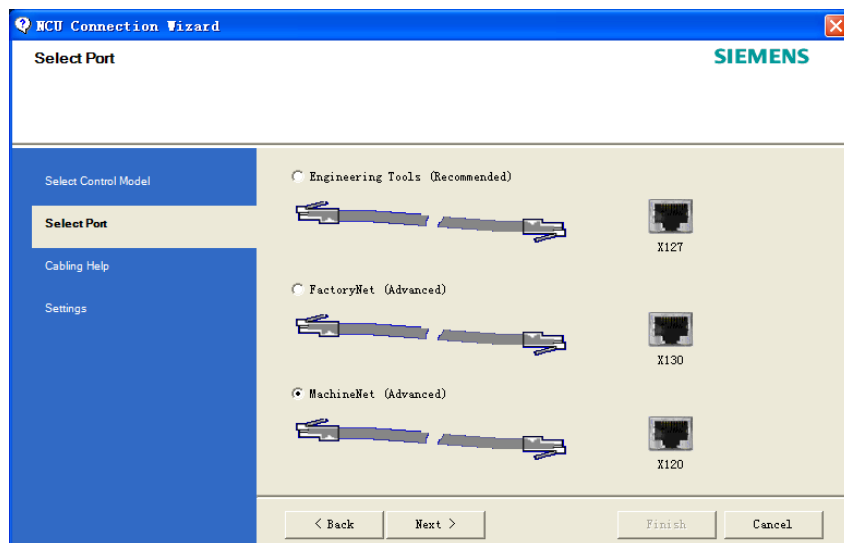


图 1-13 HMI-Advanced 配置第 3 步

(4) 出现再次确认画面，如图 1-14 所示。图中示意了具体的接口，但现场中一般接入的是交换机。

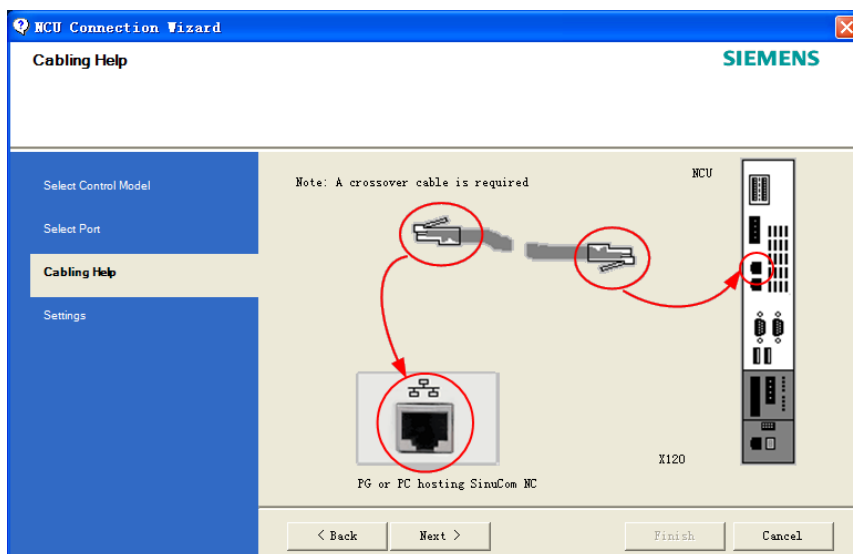


图 1-14 HMI-Advanced 配置第 4 步

(5) 设置网络 IP 地址，如图 1-15 所示。如果是 X120，则不用改变；如果是 X130，则需设置为分配好的地址。

HMI-Advanced 主要用作开始调试的配置电机，后期的电机优化测试、安全集成测试和认证 (PVsafety-ATW)，需要在此基础上再安装 Sinucom NC 来配合使用。

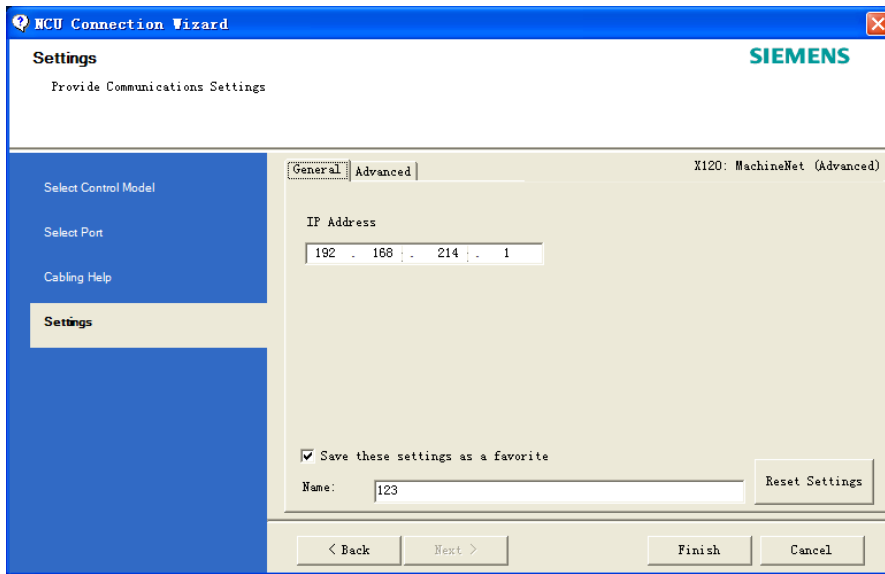


图 1-15 HMI-Advanced 配置第 5 步

### 1.3.2 WinSCP——文件传输神器，沟通 Windows 和 Linux 系统

#### 1. 概述

由于 840D sl 操作系统为 Linux，我们日常使用的计算机都是基于 Windows 系统，因此无法直接进行文件数据的交换，必须使用 WinSCP 软件进行文件数据的交互。WinSCP 是一个 Windows 环境下使用 SSH 的开源图形化 SFTP 客户端，同时支持 SCP 协议。它的主要功能就是在本地与远程计算机间安全地复制文件。840D sl 系统主要利用 WinSCP 进行根目录操作、命令台操作、传输程序、复制系统文件等。传输文件时，数控系统相当于一台 linux 服务器，而编程计算机相当于客户端。

#### 2. 应用

WinSCP 可用于传输文件、启动控制台等。

(1) 首先需要配置服务器端参数，双击 WinSCP 进入登录界面，如图 1-16 所示。配置服务器的登录文件，设置如下内容：

① Host name: NCU 的网络地址。(看连接哪个端口，若为 X120 口，则设为 192.168.214.1；若为 X127 口，则设为 192.168.215.1；若为 X130 外网，则设定为相应的外网的地址，例如，设为 10.2.30.45。)

② Port number: 设置为 22 (默认)。

③ User name: 设置为 manufact。

④ Password: 设置为 SUNRISE。

⑤ 协议选择为 SFTP (allow SCP fallback) (默认)。

然后点击保存，保存当前的设置，方便下次应用。

(2) 复制文件操作。

点击 Login，登录服务器成功后，会显示如图 1-17 所示界面。左边是本机的文件目录 (Windows 系统)，右边是 NCU 系统的文件目录 (Linux 系统)，若要复制传输文件，只要鼠标选中文件或

文件夹，直接拖入相应目录即可实现复制。

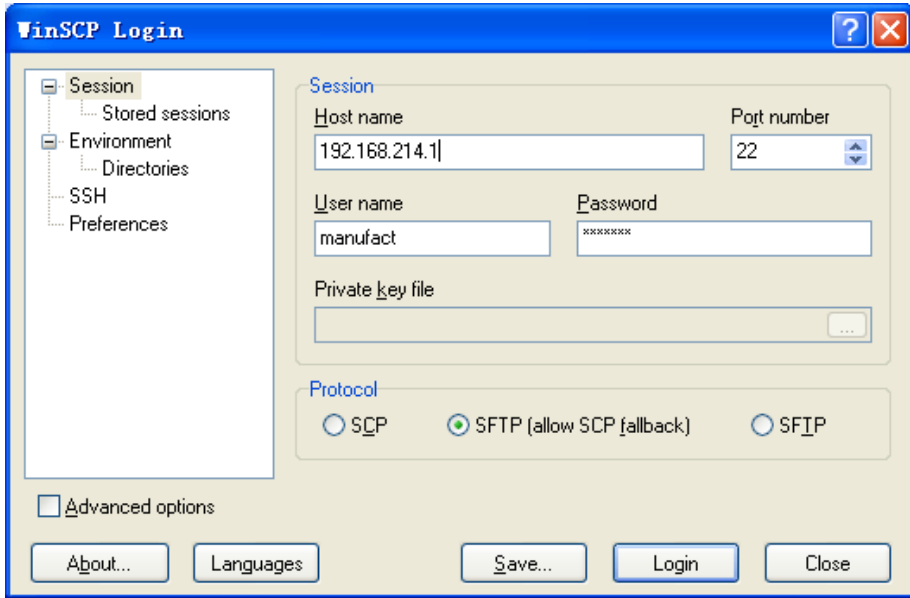


图 1-16 WinSCP 配置

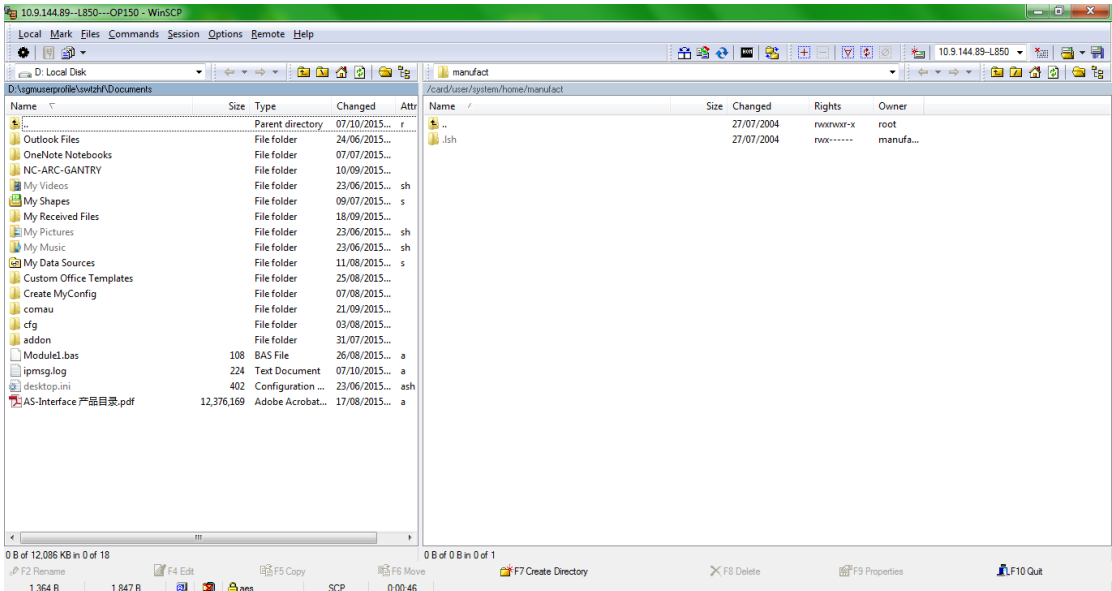


图 1-17 WinSCP 界面

常用的目录有：

① NCKS 路径：/nckfs。

② Oem 下的 HMI 路径：/card/oem/sinumerik/hmi。

③ ARC 备份存放的文件路径：/card/oem/sinumerik/data/archive。

(3) 如图 1-18 所示，通过打开目录操作可以存放书签，方便下次使用。

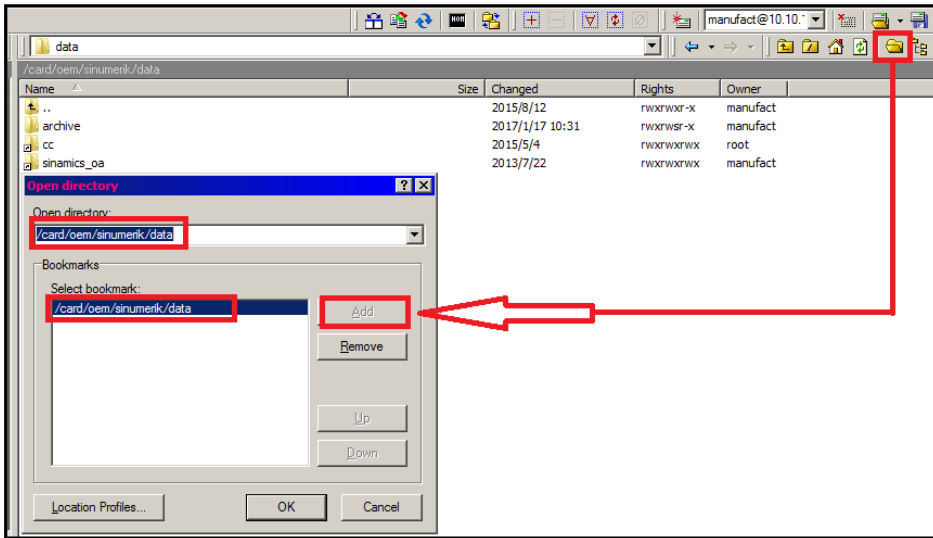



图 1-18 WinSCP 添加常用书签

(4) 启动控制台。

点击菜单栏上的按钮 ，或者点击 Commands 菜单中的 Open Terminal 子项，或者按热键 Ctrl+T，即可启动控制台窗口。



如图 1-19 所示，这个控制台的本质是 WinSCP 调用了 PuTTY 来实现的一个远程功能控制。

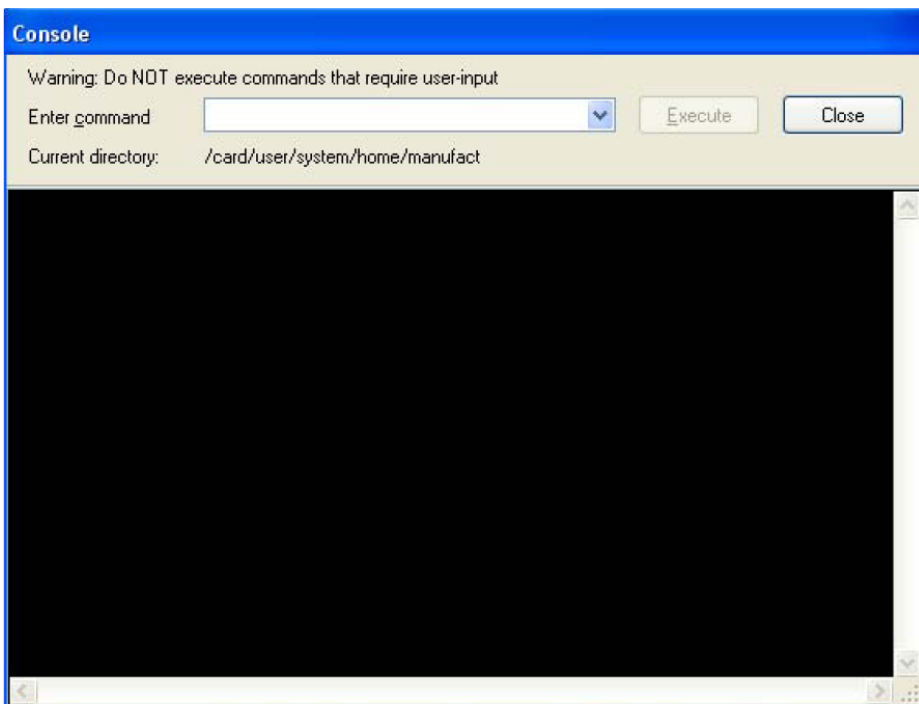


图 1-19 WinSCP 控制台窗口