

基于 ARM 的小功率 电动汽车控制器开发

高志刚 © 编著

DESIGN OF LOW-POWER ELECTRIC-VEHICLE
CONTROLLERS BASED ON ARM CHIPS

基于 ARM 的小功率 电动汽车控制器开发

高志刚 © 编著

DESIGN OF LOW-POWER ELECTRIC-VEHICLE
CONTROLLERS BASED ON ARM CHIPS



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

基于 ARM 的小功率电动汽车控制器开发 / 高志刚编著. —北京: 北京理工大学出版社, 2019.3

ISBN 978-7-5682-6841-7

I. ①基… II. ①高… III. ①电动汽车-控制器-研究 IV. ①U469.720.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 045970 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

刷 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 710 毫米×1000 毫米 1/16

印 张 / 17.75

字 数 / 321 千字

版 次 / 2019 年 3 月第 1 版 2019 年 3 月第 1 次印刷

定 价 / 66.00 元

责任编辑 / 武丽娟

文案编辑 / 武丽娟

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

前 言

随着基于蓄电池的电存储技术的不断发展以及交流电机控制技术的不断进步,电动汽车、电动托盘车、电动物流车、电动观光车、电动叉车以及场地车等得到了越来越广泛的应用。据不完全统计,低功率电动汽车控制器每年的市场总额已达数十亿元,并仍处于高速增长阶段。其共同特点在于,均需要电机控制器将蓄电池存储的电存储转化为可供交流电机使用的交流电,驱动电机旋转进而带动车辆前进。

以低功率电动汽车的控制器为例,虽然其功率一般只有几千瓦,但却具备控制动力电机、接受驾驶者指令输入以及与设备通信等多种复杂功能,承担着对整车的控制功能,对于车辆的性能具有决定作用。研究电动汽车控制器的设计方法和技术方案,对于提高系统可靠性和运行性能有重要作用。

目前基于 ARM 架构的微控制器的主频已经达到几十兆赫兹甚至更高,可以满足完成实时控制、操作数据总线、读取数字输入信号、采集模拟量信号的任务。目前已有的很多讲解芯片使用方法的教材和专著,内容主要集中在芯片的资源介绍和外设模块的通用操作等方面。

本书以研制和开发低功率电动汽车控制器为主线,详细介绍了基于 ARM 芯片 STM32F103VBT7 的控制器软硬件设计方案,具体内容包括软件开发环境的介绍、C 语言编程、串行通信接口及应用、EEPROM 数据存储、数字输入输出接口、模拟采样功能、脉冲宽度调制功能、电动机转速测量方法和控制器程序设计等。基于本书介绍的技术方案,国内已经有多家合作企业研发完成控制器并投入市场,取得了较好的经济效益和市场认同度。

本书既可以作为一线工程师的参考书,为进行相似项目的研究和开发提供参

考,也可以作为高等院校讲授 C 语言编程、ARM 芯片使用方法以及电机控制算法的教材。本书提供了大量的原始代码和较详细的注释,有助于读者深入理解技术方案原理和具体代码功能,提高将理论知识应用于工程实践的能力。

由于作者水平有限,加之编写时间仓促,本书难免有疏漏之处,敬请读者批评指教。如有任何意见和建议,请联系作者邮箱 gzg@bit.edu.cn。

作 者

2018 年 10 月

目 录

第 1 章 绪论	1
第 2 章 软件开发环境介绍	5
2.1 软件的安装	5
2.2 创建工程	8
2.3 编辑工程文件	10
2.4 下载和调试程序	22
2.5 本章总结	25
第 3 章 Keil μ Vision 中的 C 语言编程	27
3.1 C 语言简介	27
3.2 C 语言的 main() 函数	28
3.3 C 语言中的变量	30
3.3.1 变量的本质	30
3.3.2 变量的名称规范	30
3.3.3 变量的声明和赋值	31
3.3.4 基本数据类型	32
3.3.5 基本数据类型变量的声明和赋值	34
3.3.6 高级数据类型	38
3.3.7 变量的生存期	64
3.4 C 语言中的常量	67
3.4.1 数字型常量	67
3.4.2 字符型常量	67

3.5 C 语言的运算符	67
3.5.1 模块运算符	67
3.5.2 算数运算符	68
3.5.3 变量自操作	70
3.5.4 大小关系运算符	71
3.5.5 逻辑关系运算符	72
3.5.6 特殊运算符	73
3.6 C 语言中的语句	74
3.6.1 赋值语句	74
3.6.2 判断语句	74
3.6.3 循环语句 for	76
3.6.4 循环语句 while	77
3.6.5 循环语句 do/while	78
3.6.6 循环终止语句	79
3.7 C 语言的函数	80
3.8 宏定义	82
3.9 本章小结	84
第 4 章 串行通信接口及应用	85
4.1 串行通信硬件电路设计	85
4.1.1 控制器侧的硬件电路设计	85
4.1.2 计算机侧的硬件电路设计	86
4.2 上位机的串口通信软件	88
4.2.1 软件总体设计方案	88
4.2.2 上位机与 ARM 的通信协议	107
4.2.3 实时调试软件的设计与开发	109
4.2.4 参数刷写软件的设计与开发	135
4.3 ARM 芯片中 UART 通信协议的编程实现	167
4.4 系统通信功能验证	175
4.4.1 实时调试软件功能验证	175
4.4.2 参数刷写软件功能验证	176
4.5 本章小结	177
第 5 章 EEPROM 数据存储	179
5.1 基于 SPI 接口的硬件电路设计	179

5.2 SPI 协议及编程实现	180
5.2.1 SPI 模块及芯片管脚配置	180
5.2.2 利用 SPI 读写 EEPROM	183
5.3 本章小结	190
 第 6 章 数字输入输出接口	191
6.1 挡位信号处理电路及设计	191
6.2 故障信号处理电路及设计	193
6.3 制动信号处理电路及设计	196
6.4 指示灯处理电路及设计	198
6.5 主继电器驱动电路	201
6.6 代码示例	203
6.7 本章小结	204
 第 7 章 模拟采样功能	205
7.1 浮点型数据的处理	205
7.2 模拟采样电路的硬件设计	207
7.2.1 电流采样电路设计	207
7.2.2 电压采样电路设计	208
7.2.3 温度采样电路设计	210
7.2.4 加速踏板采样电路设计	213
7.3 模拟信号采样功能的编程实现	215
7.4 本章小结	221
 第 8 章 脉冲宽度调制功能	223
8.1 硬件电路设计方案	223
8.2 软件编程实现	224
8.2.1 管脚功能的配置	224
8.2.2 定时器及 PWM 功能的配置	225
8.2.3 定时器周期中断的使能与处理	227
8.3 调制算法设计	229
8.4 本章小结	231
 第 9 章 电动机转速测量方法	233
9.1 电动机编码器测速原理	234

9.1.1 绝对式编码器	234
9.1.2 增量式编码器	235
9.2 硬件电路设计	238
9.3 测量脉冲宽度测速	239
9.3.1 获取旋转方向	239
9.3.2 获得转速大小	243
9.4 计数脉冲个数测速	247
9.4.1 设置计数模式	247
9.4.2 计算转速大小	250
9.5 本章小结	252
第 10 章 CAN 通信功能	253
10.1 硬件电路及端口配置	253
10.2 通信协议与软件编程实现	254
10.2.1 通信协议介绍	254
10.2.2 通信程序设计	255
10.3 本章小结	259
第 11 章 控制器程序设计	261
11.1 主函数流程图	261
11.2 控制器算法流程图	262
11.3 车辆运行模式及处理	264
11.3.1 车辆运行模式分类	264
11.3.2 故障模式	266
11.3.3 制动模式	266
11.3.4 前进行驶模式	267
11.3.5 倒车模式	267
11.3.6 滑行模式	267
11.3.7 驻坡模式 1	268
11.3.8 驻坡模式 2	268
11.4 斜坡函数与 PWM 状态控制	269
11.5 本章小结	270
参考文献	271

第 1 章

绪 论

近些年来,采用蓄电池供电的小功率电动汽车逐渐进入人们的视野。这种类型的电动汽车具有体积小、低速转矩大、充电方便、车辆售价低、单位里程行驶成本低等优势,受到了市场的欢迎。以山东省市场为例,在当地政府的积极支持下,加上山东省作为农业大省、人口大省的市场需求推动,山东省成长为小功率电动汽车的产销大省。据统计,2016 年全国小功率电动汽车销量达 100 万辆。其中,山东省就销售了 61.83 万辆,2013 年以来销量延续 4 年保持 50% 的高速增长,已成为山东省汽车工业突出的新增长点。

根据山东省汽车行业协会对外公布的统计数据显示,2016 年山东省的小功率电动汽车产销量分别达到 62.26 万辆和 61.83 万辆,同比均增长 47.76%,产销量占全国总产量的 50% 以上。2017 年 3 月 9 日,山东省政府发布了《山东省“十三五”战略性新兴产业发展规划》,展示了山东省政府对于规范四轮小功率电动汽车管理的决心。规划中明确提出大力支持小功率电动汽车发展,推动安全、适用、便捷、低成本的小功率电动汽车发展,着力满足乡村出行需求;到 2020 年,建成聊城、临沂、枣庄、潍坊、德州等一批新能源汽车产业集聚区,纯电动轿车、载货电动车等各类新能源汽车产量达到 100 万辆。

此外,电动低速代步车、电动观光车、物流车、环卫车等也都采用了与小功率电动汽车相似的技术路线。其采用蓄电池为车辆提供电能,利用控制器将蓄电池提供的直流电压转变为交流电压并驱动交流电动机,电动机经减速器和差速器后驱动车轮转动。基于成本和可靠性方面的考虑,一般小功率电动汽车前轮设计为转向,后轮则集成后驱动、减速器和差速器。

小功率电动汽车控制器(本书中简称为控制器)作为车辆中的核心部件,其负责接收驾驶员的驾驶指令信息,用来控制电动机运行,其性能的好坏对于车辆的正常行驶具有重要作用。

从功能上来说,控制器的功能主要包括以下几个方面。

(1) 接收驾驶员的输入信息,并据此控制动力电机的旋转方向和输出力矩。驾驶员的信息包括挡位信息、油门踏板信号、刹车踏板信号等。

(2) 检测车辆状态并采取应对措施,如回收车辆的制动能量(也称馈能制动)、电子防溜坡等。

(3) 控制仪表盘显示车速、电池电压等信息。

(4) 采集电机转速、温度等信号,完成对动力电机的高性能控制。

本书介绍了基于 STM32F103VBT7 芯片的小功率电动汽车控制器的开发方法。STM32F103VBT7 是意法半导体(ST)公司生产的基于 Cortex-M3 内核的一款 32 位 ARM 微处理器。该系列芯片主频为 72 MHz,集成了定时器、CAN(Controller Area Network, 控制器局域网络)、ADC (Analog to Digital Conversion, 模数转换器)、SPI (Serial Peripheral Interface, 串行外设接口)、I2C (Inter-Integrated Circuit, 内部整合电路)、USB (Universal Serial Bus, 通用串行总线)、UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter, 通用异步收发器)等多种功能,具体特性如下。

- 基于 ARM 32 位的 Cortex-M3 内核。ARM 是微处理器行业的一家知名企业,研发和提供多种处理器的架构、相关技术及软件。Cortex-M3 是 ARM 研制的一个 32 位的处理器内核,该内核在低功耗、低成本、高性能等方面具有较突出的优势。

- 最高 72 MHz 工作频率。一般采用外接 20 M 晶振,通过配置芯片内部的倍频电路后产生 72 MHz 时钟信号。芯片内置了单周期乘法和硬件除法电路,可显著提高乘除法的执行速度。

- 从 16 k 到 512 k 字节的 FLASH 程序存储器,STM32F103VBT7 中的最后四个表明了芯片的引脚数目和存储容量等信息。

- “V”位置字符表示引脚数目,其中 T 表示 36 脚, C 表示 48 脚, R 表示 64 脚, V 表示 100 脚, Z 表示 144 脚;

- “B”位置字符表示 FLASH 的容量,其中 4 表示 16 k 字节, 6 表示 32 k 字节, 8 表示 64 k 字节, B 表示 128 k 字节, C 表示 256 k 字节, D 表示 384 k 字节, E 表示 512 k 字节;

- “T”位置字符表示芯片的封装形式,其中 H 表示 BGA 封装, T 表示 LQFP 封装, U 表示 VFQFPN 封装, Y 表示 WLCSP64 封装;

- “7”位置字符表示芯片的工作温度范围,其中 6 表示 $-40\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$, 7 表示 $-40\sim 105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

- 芯片内部提供最大为 96 k 字节的 SRAM (Static Random-Access Memory, 随机存取存储器)。

- 支持 2.0~3.6 V 单一电源供电。

- 芯片内部具有上电/断电复位管理电路、可编程电压监测器。
- 芯片内部具有多个晶体振荡器。
- 芯片内部内置时钟 PLL (Phase Lock Loop, 锁相环) 倍频电路。
- 芯片内部有 2 个 12 位 ADC 模数转换器。
 - 转换范围: 0 至电源电压, 最大允许的电源电压为 3.6 V。
 - 具有双采样和信号保持功能。
 - 内置温度传感器, 可以直接获取芯片温度。
- 芯片内部有 2 个 DMA (Direct Memory Access, 直接内存存取) 控制器, 共 12 个 DMA 通道并分为 2 组: 第一组名称为 DMA1, 有 7 个通道; 第二组名称为 DMA2, 有 5 个通道。
- 芯片支持的外设有定时器、ADC、SPI、USB、I2C 和 UART 等。
- 芯片具有 SWD (Serial Wire Debug, 串行单线调试) 和 JTAG (Joint Test Action Group, 联合测试行为组织) 接口。
- 芯片内部具有多个定时器, 功能包括捕获输入脉冲边沿、输出特定占空比的方波信号、进行脉冲计数等。
- 芯片多数端口兼容 5 V 电压信号。

STM32F103 系列处理器芯片售价低、性能可满足一般场合的需要, 因而在控制器领域具有很强的竞争力。目前已经广泛应用在电源、电机控制、手持仪器、扫描仪等设备中。市场上一些典型的小功率电动汽车控制器中, 也大量采用了 STM32F103 系列芯片。在一些传统的电机控制和工业伺服等领域, 该芯片也得到了广泛的应用。该芯片成本低、内设资源丰富等特点可以满足多种工业场合和消费电子场合的需求, 具有较好的应用前景。

本书介绍了基于 STM32F103VBT7 的小功率电动汽车控制器的完整开发过程, 控制器的额定电池电压为 60 V (例如可利用 5 节 12 V 铅酸蓄电池串联得到), 额定功率 3.3 kW。本书包括控制器的硬件电路设计、功能电路设计和软件开发等多个方面, 既可以作为学习 STM32F103VBT7 的参考, 也可以作为学习电机和小功率电动汽车控制的教材。并且其中的一些典型电路的设计, 对于从事电力电子变换器等领域的技术开发人员, 也有一定的借鉴意义。

本书以介绍 STM32F103VBT7 的使用方法为线索, 根据实际产品的功能需求不断展开论述, 最终给出了详细的小功率电动汽车控制器实现过程, 为读者提供了正确而完整的基于 STM32F103VBT7 的小功率电动汽车控制器解决方案。本书的行文顺序兼顾了项目开发的先后次序, 按照项目进展的需求介绍相关内容。通过本书, 读者可以了解 STM32F103VBT7 芯片的使用, 理解研发小功率电动汽车的关键技术, 提高项目开发效率。

第 2 章介绍 STM32F103VBT7 芯片的软件开发环境 Keil μ Vision, 包括软件的安装以及如何添加源文件和编译下载程序等。

第 3 章介绍 C 语言编程的相关知识, 包括 C 语言语法简介、C 语言数据类型、C 语言关键词介绍、C 语言函数介绍和宏定义等在控制器开发过程中需要用到知识。

第 4 章介绍控制器 UART 接口的使用, 包括硬件电路的设计和软件编程。并且基于已有的计算机软件, 介绍了一种通过上位机软件观察和修改处理器中的内存变量的方法, 为开发控制器功能、实现在线调试提供了条件。

第 5 章介绍控制器操作外部 EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory, 电可擦除可编程只读存储器) 的方案, 包括硬件的设计方案和软件的编写。利用该功能, 控制器的生产厂家可以设计一些基础参数, 如电压电流保护阈值、最大允许行驶速度等; 而控制器的销售商、售后工程师或者用户也可以在实际使用中, 微调功能参数, 改善控制器性能。

第 6 章介绍控制器的 I/O 操作方法, 以及对应的控制器的继电器控制、数字 I/O 信号的处理电路等内容。该功能可以用来处理用户输入的车辆挡位信息和故障信息等, 并可以完成故障灯闪烁等。

第 7 章介绍 ADC 电路的设计和实现, 该功能可以用来采集蓄电池电压、直流母线电容电压、控制器的输出电流、油门踏板信号和温度传感器信号等。

第 8 章介绍 PWM (Pulse Width Modulation, 脉冲宽度调制) 电路的设计和实现, 利用该功能将输出 6 路方波信号, 该信号经过驱动电路后控制主电路中的 MOSFET 工作。本章还介绍了相应的硬件电路的设计方案。

第 9 章介绍测量电动机转速的方法。具体包括: 利用脉冲边沿测量方波周期的方法, 该方法可用于测量电动机在较低转速时的速度; 利用固定周期累计的脉冲数的方法来计算电动机转速, 该方法可用于测量电动机在较高转速时的速度。本章描述了处理脉冲的硬件电路方案和软件实现方法。

第 10 章介绍 CAN 通信功能的硬件方案和软件设计, 可以实现驱动仪表工作, 可实时显示车辆运行状态。

第 11 章介绍控制器程序的总体设计框架。基于前述章节完成的分项功能, 本章将所有功能进行整合, 设计了控制器的整体软件框架和各功能模块的实现方法。

第 2 章

软件开发环境介绍

Keil μ Vision 软件提供了相应的编程环境，可以将用户采用汇编语言或者 C 语言编写的程序编译后生成可供 STM32F103VBT7 处理器使用的代码并传送到芯片中，完整的过程框图如图 2-1 所示。

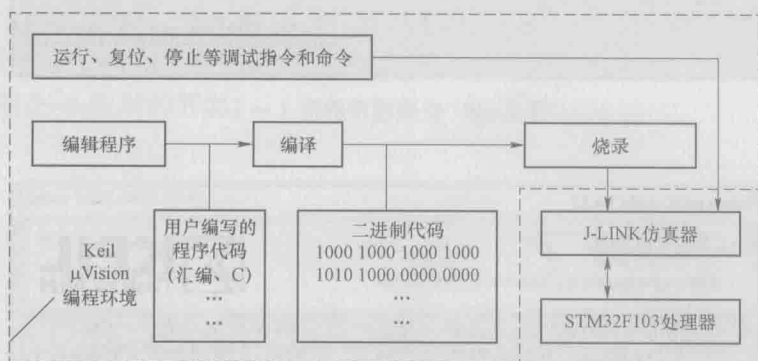


图 2-1 利用 Keil μ Vision 编写程序的过程框图

如图 2-1 所示，基于 Keil μ Vision 编程环境，用户可以使用汇编语言或者 C 语言编写程序，然后利用软件提供的编译功能，产生二进制代码文件。之后可以通过 J-LINK 仿真器将生成的二进制代码文件内容烧写到处理器中。Keil μ Vision 还提供了在调试模式下对处理器状态进行控制的功能，包括运行、复位、停止等功能，以利于获取和控制芯片的运行状态。

2.1 软件的安装

本书选择 Keil μ Vision V4.12 作为软件开发工具，该软件的安装程序可以从 Keil

公司的官方网站（www.keil.com）下载。运行安装程序后，将弹出图 2-2 所示的安装界面，其中表明了软件的名称和版本号，单击界面的“Next>>”（下一步）按钮之后，将会显示图 2-3 所示的软件条款。

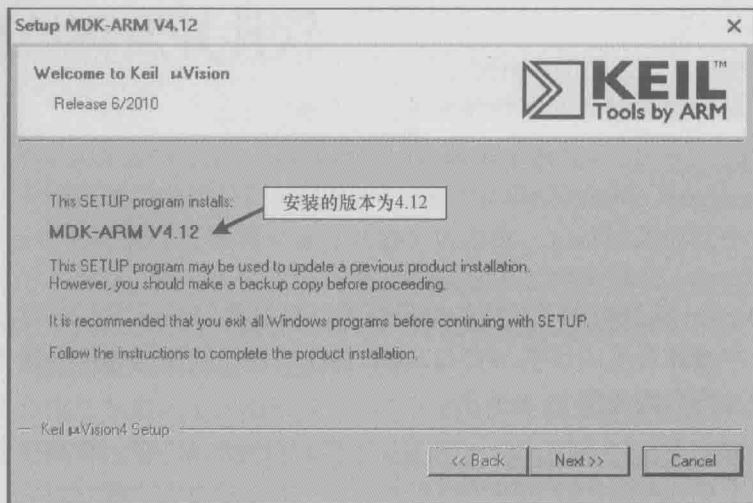


图 2-2 安装程序界面（一）

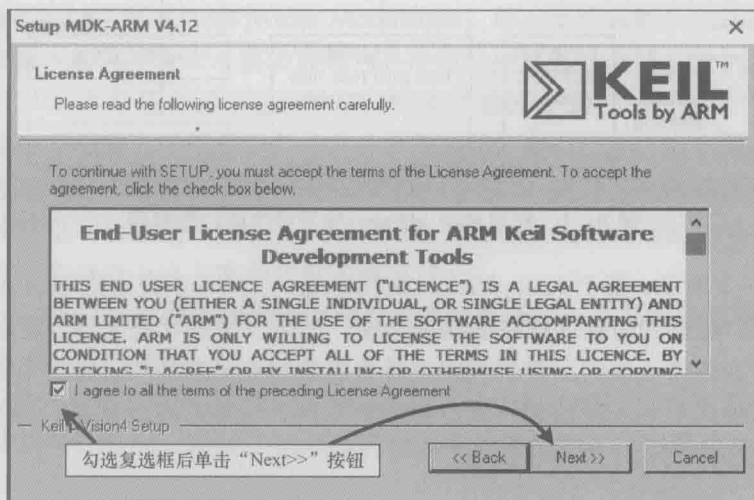


图 2-3 安装程序界面（二）

在图 2-3 中，选中复选框，同意软件条款。之后单击界面的“Next>>”（下一步）按钮，将会显示图 2-4 所示的选择软件安装位置的界面。

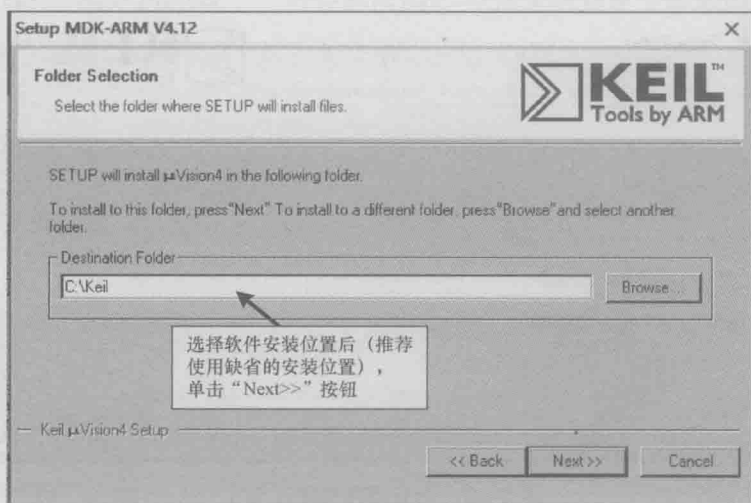


图 2-4 安装程序界面（三）

在图 2-4 显示的选择软件安装位置的界面中，可以根据计算机硬件资源和用户习惯修改软件的安装位置。修改完毕后，单击界面的“Next>>”（下一步）按钮，将会显示图 2-5 所示的界面。



图 2-5 安装程序界面（四）

在图 2-5 所示的界面中，用户填写完毕客户信息后，单击界面的“Next>>”（下一步）按钮，软件开始安装，其运行界面如图 2-6 所示。



图 2-6 安装程序界面（五）

等待软件安装完成以后，将弹出图 2-7 所示的界面，此时单击“Finish”按钮完成安装即可。完成安装后，可以在计算机的桌面以及开始菜单中找到“Keil μ Vision”的程序图标。

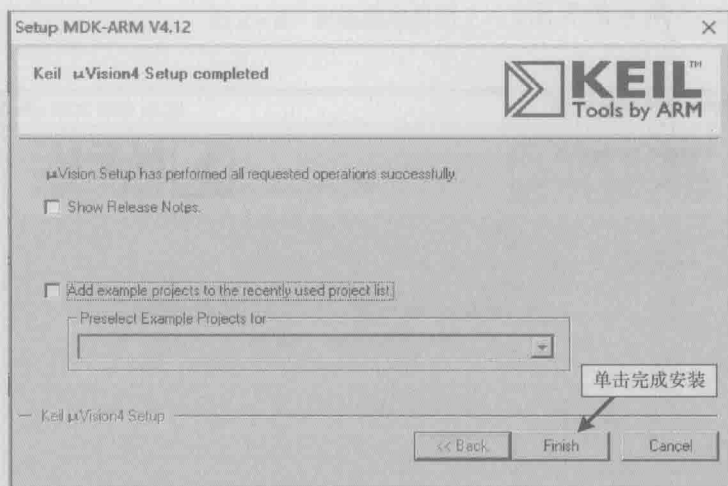


图 2-7 安装程序界面（六）

2.2 创建工程

启动 Keil μ Vision 后，如图 2-8 所示，单击“Project”，在弹出的菜单中进一