

分 类 号: S219
密 级: 公 开

单位代码: 10193
学 号: 20211325



吉林农业大学

硕士学位论文

基于单片机监控的拖拉机电源管理系统的研究

The Research of Tractor Power Management System based on Single-chip Microcomputer Monitoring

作者姓名: 刘冯震

学位类别: 农业硕士

专业名称: 农业工程与信息技术

研究方向: 现代农业机械装备设计

指导教师: 孟宪章 高级实验师

所在学院: 工程技术学院

2023 年 5 月

摘 要

拖拉机作为农业机具中重要的动力机械,在农业机械化中起着重要的作用。拖拉机启动时需要消耗蓄电池大量的电量,当蓄电池的电量不足时,会导致拖拉机无法正常启动。当拖拉机未启动,发电机不发电,使用拖拉机电源进行夜间照明等耗电用途时,蓄电池会一直处于放电状态,现有农机会挂载很多电驱装置,发电机供电不足,蓄电池会发生过放电现象,导致其剩余电量无法满足拖拉机正常启动。因此对拖拉机电源管理系统进行研究具有重大意义。本文设计一种拖拉机电源监测管理系统,主要研究内容如下:

(1) 设计蓄电池 SOC 估算算法。由于蓄电池属于非线性系统,且影响因素众多,因此最终使用扩展卡尔曼滤波法将非线性的电池系统线性化,再通过标准卡尔曼滤波法进行估算。为了使估算的数值精确,在蓄电池的复合模型中引入等效电流系数与温度系数进行修正。

(2) 拖拉机电源监测管理系统设计。完成基于 STM32F103C8T6 监控的拖拉机电源管理系统的硬件电路设计与软件设计,并制作实物。该系统可以将发电机输出电压控制在 12.8V-13.8V 之间,并实时监测蓄电池的电压、电流和温度,对蓄电池 SOC 进行估算。

(3) 拖拉机电源监测管理系统性能验证试验。通过示波器与汽车万能试验台测得受 STM32F103C8T6 控制的发电机电压波形,将其与受电压调节器控制的发电机输出电压波形与 Simulink 仿真得到的波形进行对比,通过对比结果分析,发现 STM32F103C8T6 可以代替电压调节器实现控制发电机输出电压的功能,从而证明拖拉机电源监测管理系统性能满足设计要求。

(4) 对 STM32F103C8T6 监测蓄电池参数及算法估算蓄电池 SOC 的试验与结果进行分析。本文采用三个不同的蓄电池对拖拉机进行启动试验,将 STM32F103C8T6 测得的蓄电池电压、电流、温度和估算出的蓄电池 SOC 与实际试验使用的智能蓄电池检测仪测得的数据结果进行对比分析,得出算法估算出的蓄电池 SOC 准确度可以满足实际要求。通过以上研究,最终得出结论:当蓄电池电压降为 7.21V,蓄电池 SOC 在 30%时,拖拉机能够完成正常的三次启动,此时蓄电池处于过放电状态。

关键词: 单片机 (STM32F103C8T6), 蓄电池, 复合模型, SOC 估算, 扩展卡尔曼滤波法

Abstract

Tractors play an important role in agricultural mechanisation as an important power machine in agricultural machinery. The tractor requires a large amount of battery power to start, and when the battery power is low, it can cause the tractor to not start properly. When the tractor is not started, the generator does not generate electricity, use the tractor power for night lighting and other power-consuming purposes, the battery will always be in a discharged state, and nowadays the agricultural machinery will mount many electric drive devices, the generator power supply is insufficient, the battery occurs over-discharge phenomenon, resulting in its remaining power can not meet the tractor normal start. Therefore the study of tractor power management system is of great significance. This paper designs a tractor power supply monitoring and management system. The main research content is as follows:

(1) Design the battery SOC estimation algorithm. As the battery is a non-linear system and there are many factors affecting it, the extended Kalman filter is used to linearise the non-linear battery system and then the standard Kalman filter is used for estimation. In order to make the estimated values accurate, the equivalent current coefficient and temperature coefficient are introduced in the composite model of the battery for correction.

(2) Tractor power monitoring and management system design. Complete the hardware circuit design and software design of the tractor power management system based on STM32F103C8T6 monitoring, and make the physical object. The system can realize the generator output voltage control between 12.8V-13.8V, and real-time monitoring of the battery voltage, current and temperature, and the battery SOC estimation.

(3) Tractor power monitoring and management system performance verification test. The waveform of the generator voltage controlled by the microcontroller was measured by an oscilloscope and an automotive universal test bench, and the waveform of the generator output voltage controlled by the voltage regulator was compared with the waveform obtained by Simulink simulation, and through the analysis of the comparison results, it was found that the microcontroller can replace the voltage regulator to achieve the function of controlling the generator output voltage, thus proving that the performance of the tractor power monitoring and management system meets the design requirements.

(4) The microcontroller monitoring battery parameters and algorithm to estimate the battery SOC test and results analysis. This paper took three different batteries to the tractor for starting

test, the microcontroller measured the battery voltage, current, temperature and the estimated battery SOC and the actual test using intelligent battery tester data results for comparison and analysis, the algorithm to estimate the battery SOC accuracy to meet the actual requirements. Through the above study, the final conclusion is that when the battery voltage drops to 7.21V and the battery SOC is around 30%, the tractor can still complete three normal starts, the battery is in the overdischarge state.

Key words: Microcontroller (STM32F103C8T6), Battery, Composite model, SOC estimation, Extended Kalman filter method

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 本文研究背景和意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	1
1.3 主要研究内容.....	3
第二章 拖拉机电源管理系统总体结构与蓄电池影响因素的分析	4
2.1 拖拉机发电机结构及工作原理	4
2.2 电压调节器的控制原理.....	5
2.3 铅酸蓄电池的简介.....	6
2.4 影响铅酸蓄电池容量的参数	7
2.5 本章小结.....	9
第三章 铅酸蓄电池剩余容量的算法研究	10
3.1 铅酸蓄电池 SOC 的概念.....	10
3.2 SOC 计算方法分析.....	11
3.3 扩展卡尔曼滤波法.....	13
3.4 对蓄电池模型的研究.....	15
3.5 蓄电池初始荷电状态的确定	18
3.6 扩展卡尔曼滤波法的复合模型修正	19
3.7 基于复合模型的 EKF 法估算蓄电池 SOC	20
3.8 本章小结.....	22
第四章 拖拉机电源监测管理系统的总体设计	23
4.1 拖拉机电源监测管理系统整体设计	23
4.2 电源模块设计与单片机选型	23
4.3 发电机电压控制及监测电路的设计	26
4.4 蓄电池监测系统的硬件电路	27
4.5 通信模块电路设计.....	29
4.6 监测系统的整体软件设计流程	30
4.7 基于硬件电路设计的实物	32
4.8 本章小结.....	33
第五章 基于单片机监控的拖拉机电源管理系统试验	34
5.1 单片机控制发电机电压试验	34
5.2 蓄电池的相关参数测量.....	36
5.3 本章小结.....	49
第六章 结论与展望	50
6.1 结论.....	50

6.2 创新点.....	50
6.3 展望.....	50
参考文献.....	52

第一章 绪 论

1.1 本文研究背景和意义

拖拉机是农业机械化生产中主要的动力机具，拖拉机使用稳定性对农业机械作业效率有决定性影响。拖拉机电源管理系统作为拖拉机重要组成部分，保证其稳定运行可有效降低拖拉机故障率。由此人们开始重视起拖拉机电源管理系统。蓄电池、发电机、电压调节器共同构成了拖拉机电源管理系统。

蓄电池在发动机启动时为起动机点火和照明等方面起重要作用。蓄电池会在发电机不发电或者在发电机输出电压比蓄电池电压低的时候为用电设备进行供电，如果发电机出现过载现象，蓄电池就会与发电机协同为用电设备供电。蓄电池会在发电机的输出电压比蓄电池电压高且发电机负载较小的情况下进行充电，并储存多余的电能转换为化学能^[1]。电压调节器的作用是在发电机转速改变的情况下，通过二极管通断改变发电机的磁场磁通，以保持发电机产生的感应电动势恒定。

目前市面上使用传统电压调节器来调节发电机的发电电压，其并不具备监测功能，不能监测蓄电池的电量使用情况。电量消耗过大、发电机的电压过低无法对蓄电池充电，从而导致蓄电池的电量不足，拖拉机起动机无法正常启动；发电机输出电压过高会损耗蓄电池使用寿命。因此需要对蓄电池剩余电量和发电机电压进行合理监测，以此来保证拖拉机能够正常启动。

本文使用 STM32 单片机来代替电压调节器，设计蓄电池电压监测功能，并对蓄电池的 SOC 进行估算，在蓄电池电量达到最低使用值时发出警报，继而降低拖拉机抛锚的可能，提高了拖拉机的使用可靠性。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国外对蓄电池监测技术的研究现状

随着电源管理系统的重要性广泛的被人们认知，美国、德国、英国等发达国家很早就已经开始对蓄电池监测技术进行研发，并投入了大量资金与精力，因此国外在监测电源管理系统技术上成果甚是丰富^[2]。

美国的电力应用工业衍生出了其蓄电池监测系统技术 BMS（Battery Monitoring System），而铅酸蓄电池在线健康状况检测系统于 20 世纪 80 年代末才被美国电力研究所与国家电能研究公司共同协作研发成功^[3]。此系统主要是对蓄电池的浮充电流、电池所在

环境温度、电解液比值、各个单体电池电压及电极使用状况等参数进行监测，能够反映出蓄电池的健康状况。但目前这个系统的参数选取与估算的方法还需要进一步研究。

Debarde 和 Sheldon 在 1986 年就对蓄电池内阻进行了测量，首先提出铅酸蓄电池的内部阻抗与寿命存在联系，过程中运用 5Hz 和 45Hz 两种频率的交流电对内阻进行测量，得出蓄电池放电测试可以用内部阻抗测量代替的结论。在后续研究中，M Hawkins 和 LOBurling 又对蓄电池在充放电以及不同容量与频率下内阻的变化问题进行研究。这些成果对后期蓄电池进一步研究提供了一定的理论依据^[5]。

国外学者在测得蓄电池相关参数的基础上对预估算法开始进行深入的研究。RafaelM.S.Santos 等在 2017 年精准的预估出在不同的温度下基于扩展卡尔曼滤波算法的蓄电池健康情况（SOH）。在 10℃至 70℃不同温度下采集电池温度数据。经过多次数据收集得出了准确的电池模型参数，有效的利用了电阻递归估计与电池等效电路模型，获得令人满意的蓄电池剩余电量（SOC）估算结果^[6]。

迄今为止，大量的蓄电池监测管理系统已经被生产并投入使用，例如美国的 Tesla Roadster 和 Smart Guadr 系统、日本的 Leaf、德国的 BADICHEQ 和 BATTMAN 系统。其中 BATTMAN 系统可以通过简单的软硬件调整应用于各种型号的电池组。因此，该系统目前在市场上的应用十分广泛，通用性强^[8]。

目前，许多企业和研究机构开发了一系列具有自己特点电源管理系统，可以帮助用电系统有效利用蓄电池。但是由于此类产品的开发和制造被要求必须具有很高的标准，国外一直致力于这一领域的研究，以期未来能够推行完善、高效、经济的蓄电池监控系统^[9-11]。

1.2.2 国内对蓄电池监测技术研究现状

国内对于蓄电池监测方面的研究起步比较晚，但是国内也很重视对蓄电池充放电监测与控制技术研究，目前对于蓄电池充放电监测系统关键技术的研究已取得重大成果，并进入使用阶段^[12]。

清华大学汽车安全与节能国家重点实验室在 2003 年提出，监测电动汽车蓄电池的健康状况时，蓄电池 SOC 预估会受到电池的充放电倍率、温度、自放电、老化等因素影响。因此对蓄电池的 SOC 进行估算时，需要结合上述影响因素选择合适的算法^[13]。

2009 年湖北张书郎提出了一种能够监测蓄电池发电电压，实现过压保护、过流保护功能的发电机电压调节器。该发电机电压调节器具备延时功能，可以在发动机启动时控制蓄电池只对起动机进行供电，缩短启动时间，减少蓄电池电量损耗^[14]。

许多的蓄电池制造商都开始致力于监测和控制铅酸蓄电池充放电技术的研究，西安柯蓝公司设计的 CR-AC24/05 蓄电池检测仪，其进行放电试验时，需要将电池组与电源隔离，降低了其作为后备电源的作用，其优点为其检测精度高^[15、16]。

蓄电池电源管理系统的进步与发展关乎着国家工业与军事实力的提升。就目前已有的研究成果来看,蓄电池监测系统研究仍有很多不足之处,国家对蓄电池电源管理技术大力扶持,投入资金,促进企业与高校的密切交流和资源共享,加大对电源管理系统监测技术的探索力度,以此来实现这项技术的弯道超车,打破欧美国家对电源管理监测系统的技术垄断。

拖拉机作为农业农业机械中的主要动力机械,其电源管理系统是拖拉机重要的组成部分。但是目前电源管理系统未在拖拉机应用,本设计将针对拖拉机电源管理系统进行设计,以实现发电机电压控制、蓄电池的电压、电流和温度监测并通过算法估算出蓄电池的 SOC。使用 STM32 单片机代替传统电源管理系统中的电压调节器,在控制发电机输出电压的同时,对蓄电池相关参数的监测与 SOC 估算。

1.3 主要研究内容

本文的主要研究内容是用 STM32 单片机来代替电压调节器实现对拖拉机发电机的电压控制,同时监测蓄电池的参数状态,并在此基础上研究蓄电池 SOC 的估算方法,实现对蓄电池剩余电量较为精准的预测。具体研究内容如下:

(1) 对国内外拖拉机发电机电压智能控制技术现状、发电机结构、运行原理和发电机电压调节器的控制原理进行深入的分析,在此基础上,制定单片机控制发电机电压的控制策略,并实现监测发电机输出电压的功能。

(2) 介绍蓄电池的原理及特性,同时阐述蓄电池相关参数对蓄电池剩余电量的影响,从而进行蓄电池剩余电量预估方法的研究。对估算蓄电池荷电状态的方法及其优缺点进行阐述,最终确定使用扩展卡尔曼滤波法来进行对蓄电池 SOC 的估算,对其推理的过程与计算的方法进行表述。根据实际数据进行仿真验证和结果分析,以验证估算方法的可行性。

(3) 蓄电池监测系统的设计与实现,以高性能 32 位的单片机 STM32F103C8T6 为核心,基于该芯片对拖拉机电源管理系统硬件电路进行设计,其主要组成为供电电源电路、电压采集模块、蓄电池电流采集模块、温度采集模块、通信模块等构成。同时还设计了基于硬件电路的软件流程,最终基于此设计做出完整的实物。

(4) 对拖拉机进行起动试验。将试验测得蓄电池的电压、电流、温度参数与单片机测得的电压、电流和温度数值进行对比,并分析试验误差;再将算法估算得到的蓄电池的 SOC 于实际测得的蓄电池的 SOC 值进行对比,并分析讨论估算结果误差,验证算法的精确性。最终分析得到电压降到何值时,蓄电池的 SOC 剩余多少时,起动机还能正常起动三次,以致拖拉机不会在田里抛锚,从而实现本试验的最终目的。

第二章 拖拉机电源管理系统总体结构与蓄电池影响因素的分析

通过对拖拉机发电机、电压调节器和蓄电池的结构和工作原理的分析,得到电压调节器控制发电机原理与对蓄电池剩余电量的相关影响因素,方便下文对蓄电池 SOC 的估算算法研究与单片机控制发电机电压同时监测蓄电池的硬件电路设计。

2.1 拖拉机发电机结构及工作原理

发电机是拖拉机电源管理系统中的重要部分,发电机在正常运行情况下能够为拖拉机用电设备供电还能够为蓄电池进行充电。硅整流发电机被广泛应用于拖拉机上,其由转子、定子、整流器、端盖和电刷组成^[17]。发电机开始转动时,发电机转子中磁场绕组有电通过,从而产生磁场,磁场与定子线圈产生相互运动,从而形成三相感应交流电动势。如图 2.1 所示为硅整流发电机结构图。

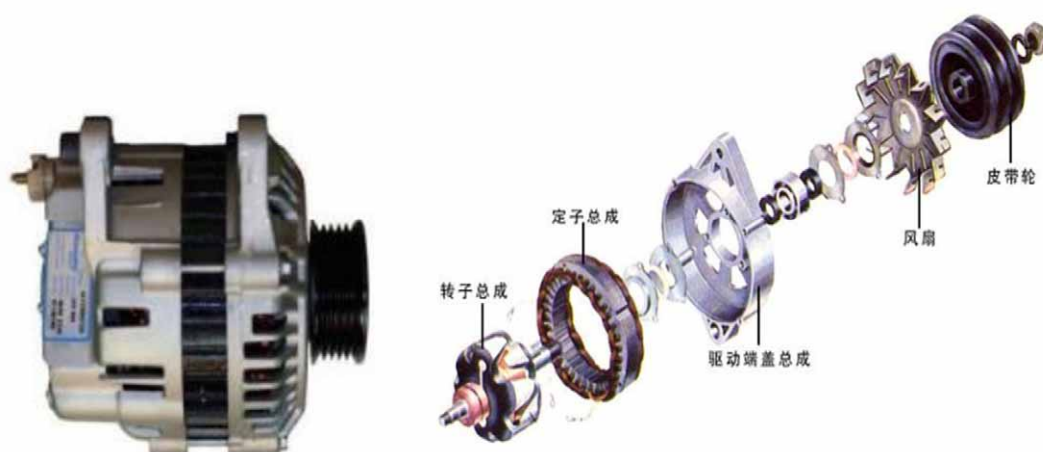


图 2.1 硅整流发电机结构图

Fig. 2.1 Structure of a silicon rectifier generator

2.1.1 转子

发电机的转子在电压通过时能够产生磁场,定子绕组线圈对其进行切割进而产生感应电动势。磁场绕组、轴、滑环和两块爪极等构成了转子。其中,转子的两块爪极都为鸟嘴型,其由 4 或 6 只鸟嘴型的磁极排列组成,装配在转子的轴上,磁轭则装在爪极的空腔位置,其上绕有磁场绕组(又称励磁绕组或转子线圈)。在励磁绕组上引出两条引线,分别焊在滑环上,滑环与后端盖上的两个电刷相接触。当后端盖上的两个电刷通有直流电时,转子中磁场绕组便会有电流通过,会在发电机内部形成磁场,使得两块爪极被磁化,一块为 N 极,另一块为 S 极^[18]。

2.1.2 定子

定子在发电机中是由铁心与三相绕组组成的,是能够产生感应电动势的机构。三相感应电动势的产生是通过励磁绕组在转子中形成的磁场,定子三相绕组对磁感线进行切割。

2.1.3 整流器

整流器通常由六个硅二极管组成,它将发电机产生的交流电转换成直流电,供整机使用。但由于使用过程中整流器产生的热量很大,因此通常机具上皆配有散热板。

2.1.4 端盖和电刷总成

发电机前后端盖通常是铝合金制成,能够很好地保护发电机的内部结构。发电机的电刷总成是由电刷弹簧和电刷架组合而成。两个电刷都安装在电刷架的孔中,并在电刷弹簧的压力作用下,与转子总成上的滑环接触,可以向转子内的磁场绕组提供产生磁场的电流。当电流流过发电机转子中的励磁绕组时,转子旋转,定子中的三相绕组切断磁感线产生交流电动势,如式:

$$f = \frac{Pn}{60} \quad (2.1)$$

式中: P —磁极对数; n —发电机转速, r/min 。

2.2 电压调节器的控制原理

硅整流发电机在正常工作时,由于发电机转速发生改变,发电机输出的电压值也随之变化。通过发电机的电压调节器控制可以使发电机输出稳定的电压,因此根据交流发电机的工作原理得出公式,产生的感应电动势计算如式:

$$E_{\Phi} = C_e \cdot \Phi \cdot n \quad (2.2)$$

式中: C_e —发电机的结构常数; n —转子转速, r/min ; Φ —转子的磁极磁通, Wb 。根据公式(2.2)所示,发电机产生的感应电动势与转子的转速和磁场磁通成正比。在发生发电机转速改变的情况下,可以改变发电机的磁场磁通,以保持发电机产生的感应电动势恒定。励磁电流产生了磁场磁通,与磁通的大小成正比,通过改变励磁电流的大小,可以改变发电机的磁场磁通电流。发电机的调节器工作原理如下:当发电机转速产生变化时可以通过改变励磁电流来改变磁通量,使发电机的输出电压保持在一定范围内。如图2.2所示,其为发电机电压调节器的一个典型电路之一,电压调节器通过电路中2VT功率开关三极管,来控制发电机磁场电路的通断,从而改变发电机的励磁电流来改变磁通^[19]。

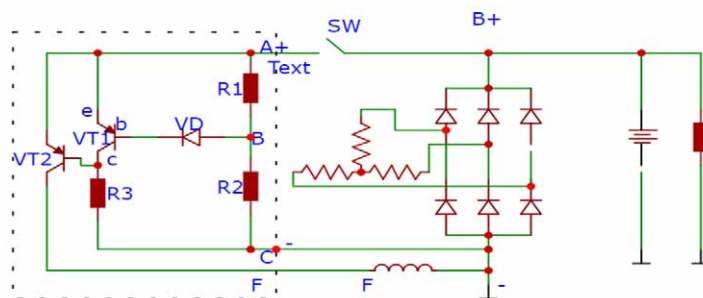


图 2.2 内搭铁电子调节器的基本电路

Fig. 2.2 Basic circuit of the internal hitch electronic regulator

2.3 铅酸蓄电池的简介

2.3.1 铅酸蓄电池基本结构

铅酸蓄电池里面有两个电极，二氧化铅（ PbO_2 ）为正极，铅（ Pb ）为负极，反应时的电解质溶液为硫酸（ H_2SO_4 ）。充电时，负极上硫酸铅（ PbSO_4 ）被还原为 Pb 的速率大于生成 PbSO_4 的速率，负极上变为 Pb ；同理，正极上 PbSO_4 被氧化为 PbO_2 的速率也会变大，正极上变成 PbO_2 。放电时，负极失去电子被氧化为 PbSO_4 ，正极获得电子被还原为 PbSO_4 。在上述过程中，外电路会产生定向移动的电荷，并且伴随着化学能转化为电能的释放过程 [20-22]。

铅酸蓄电池结构如图 2.3 所示，外壳、正极板、负极板、正负极的接线柱、过滤网、隔板和安全阀等共同构成了铅酸蓄电池 [23]。

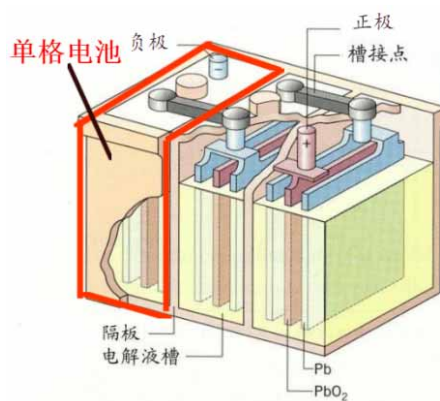


图 2.3 铅酸蓄电池构造图

Fig. 2.3 Construction of a lead-acid battery

2.3.2 铅酸蓄电池工作原理

外电路提供给蓄电池的电能在蓄电池充电的过程中被转化为化学能，并且进行储存。被储存起来的化学能会在放电时以电能的形式将其释放，释放方式是氧化还原反应。铅酸蓄电池工作原理就是电能与化学能在蓄电池充放电时的相互转化。充放电过程如图 2.4、

图 2.5 所示^[24]。

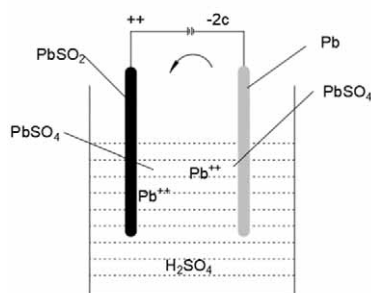


图 2.4 充电过程

Fig. 2.4 Charging process

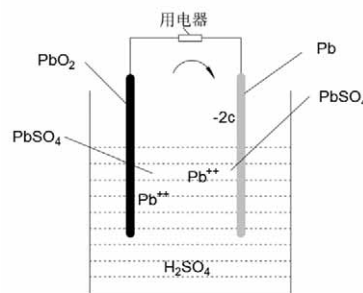
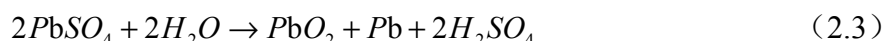


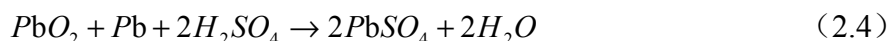
图 2.5 放电过程

Fig. 2.5 Discharge process

双极硫酸盐化理论是用来解释铅酸蓄电池的成流反应的，其是由 J.H.Gladstone 和 A.Tribe 共同发明的并且被大众所认可的理论^[25, 26]。根据此理论可知，蓄电池充电时的化学方程式如式所示。



放电时的化学方程式如式所示。



铅酸蓄电池在一般情况下会在工作以后自动恢复到原始状态，并且可以进行多次重复使用，通过公式 (2.3) 和 (2.4) 可知，充电、放电之间是互为可逆反应。

2.4 影响铅酸蓄电池容量的参数

铅酸蓄电池的蓄电能力是通过蓄电池的容量来表示的，蓄电池的容量则是将蓄电池完全充满电，然后使用某一电流放电到某一终止电压时所释放的总能量。

蓄电池容量又分为三种：实际容量、额定容量和理论容量^[27]。实际容量一般会低于理论容量与额定容量，因为实际容量是指实际应用中以实际放电电流与实际截止电压算出的放电量。各国对蓄电池的额定容量都有不同的标准，我国是在 25℃ 下以 20 小时为标准，通过某一放电率放电至截止电压时放出的最小电量为蓄电池的额定容量^[28]。一般用小于 0.05C 放电电流对蓄电池进行放电时，得到的蓄电池总电量会大于额定容量；相反，用大于 0.05C 的放电电流对蓄电池进行放电时，得到的总电量会小于额定容量。本小节准确描述了影响电池容量的特征参数。

2.4.1 铅酸蓄电池的电压

铅酸蓄电池荷电状态与铅酸蓄电池的电压息息相关。蓄电池的电动势是指在蓄电池断路时，两个电极产生的电位差。根据能斯特方程，可以得到其表达式如下式所示^[29]。

$$E = E^0 + \frac{RT}{F} \ln \frac{\alpha(\text{H}_2\text{SO}_4)}{\alpha(\text{H}_2\text{O})} \quad (2.5)$$

式中： E —电动势，V； E^0 —标准电动势（单节 2.047V），V； R —摩尔气体常数，大小为 $8.31\text{J}/(\text{k}\cdot\text{mol})$ ； T —温度（K）； F —法拉第常数，（96500C/mol）； $\alpha(\text{H}_2\text{SO}_4)$ —硫酸相对密度； $\alpha(\text{H}_2\text{O})$ —水相对密度。

蓄电池的开路电压（OCV）是指长时间静置后开路状态下的端电压数值^[30]。蓄电池开路电压与电动势都属于电解液浓度的函数，并且开路电压更接近于电动势。蓄电池的开路电压表达式如式：

$$OCV = V_0 + U_r + U_{R0} \quad (2.6)$$

其中， V_0 为蓄电池工作时的电压， U_r 为蓄电池欧姆电阻的电压， U_{R0} 为蓄电池极化电阻的电压。同时，蓄电池开路电压也可以通过电解液的浓度来表达^[31]，其表达式如式：

$$OCV = 1.85 + 0.917(\rho_s - \rho_h) \quad (2.7)$$

其中， ρ_s 和 ρ_h 分别为蓄电池的硫酸密度和蓄电池的水密度。有上述两式可知，铅酸蓄电池的开路电压与其内部的电解液浓度、电极材料和极化情况等密切相关，这些因素也都与蓄电池的容量密切相关。

2.4.2 铅酸蓄电池的充放电电流

对蓄电池进行以 20 小时的速率放电来确定蓄电池的额定容量，蓄电池的电池容量与充放电电流之间的函数关系式如式：

$$C_u(t) = \int_0^t I dt \quad (2.8)$$

容量相同的蓄电池对其使用不同的放电电流进行放电，最终得出的蓄电池容量也各不相同。日本的一家蓄电池公司对此进行了测试，从而得到不同放电速率下，蓄电池的电压与放电时间的关系^[32]，如图 2.6 可见。因此得出在不同的放电速率下所放出的蓄电池电量也是不同的。

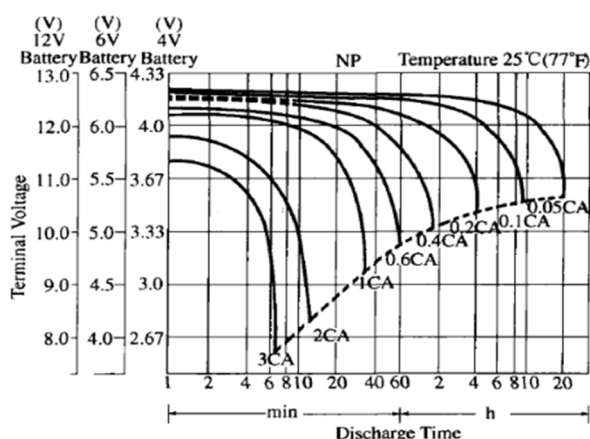


图 2.6 不同放电速率下蓄电池电压与放电时间关系

Fig. 2.6 Battery voltage versus discharge time at different discharge rates

2.4.3 铅酸蓄电池内阻

蓄电池充电和放电时电流在经过蓄电池时会受到阻力,该阻力就是蓄电池的内阻。蓄电池的内部结构十分复杂,其内阻也分为三部分:欧姆电阻、电化学极化内阻、浓差极化内阻^[33]。

蓄电池在充放电过程中会产生化学反应,电解液的浓度也会发生改变。而电解液浓度的大小与蓄电池的剩余容量有关系,所以电解质的浓度高低会影响蓄电池的剩余容量,浓度越高剩余容量就越多,二者成正比关系。

2.4.4 铅酸蓄电池温度

蓄电池的工作温度正常为 25℃。蓄电池的温度过高会直接对蓄电池造成影响,影响蓄电池的容量。所以本文对蓄电池的温度监测也是必不可少的。如图 2.7 可见在不同的温度下,蓄电池的容量变化。

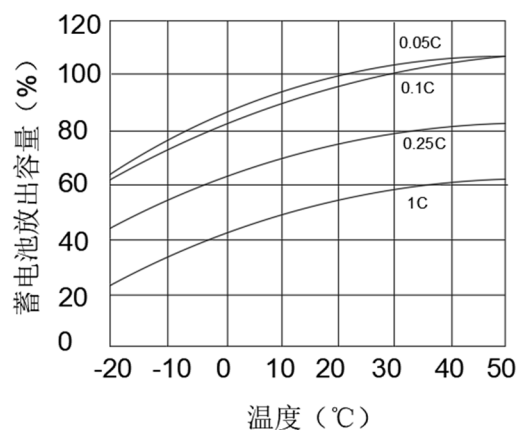


图 2.7 不同温度下蓄电池的容量

Fig.2.7 Capacity of the battery at different temperatures

2.5 本章小结

本章介绍了拖拉机电源管理系的三个组成部分:发电机、蓄电池和电压调节器。并详细介绍了它们的功用与蓄电池 SOC 的影响因素,方便下文对蓄电池的 SOC 估算算法的选择与研究。

第三章 铅酸蓄电池剩余容量的算法研究

目前有很多算法都可以对蓄电池 SOC 进行估算,并且每一个算法都有它所适用的条件,有些算法精度不高,但是其简单实用,适用于便携式设备;而有一些算法则是精确度很高,但其运算过程复杂,需要进行大量运算。因此,想要设计好一个算法,就需要先清楚算法的研究对象,再根据研究特点来确定设计出的算法所需要满足的要求。

针对本文对拖拉机蓄电池 SOC 的估算,拖拉机的工作地点一般是在田地里,因此其受到的干扰因素众多;并且拖拉机的蓄电池剩余容量会受到其电压、电流和温度等因素的影响。因此本文设计的拖拉机蓄电池 SOC 算法必须具有矫正外界干扰的作用,能够使蓄电池的 SOC 估算逼近于真实值;并且需要确保算法的精确度。只有进行高精度的 SOC 估算数值才能保证蓄电池不会因为过充或过放导致寿命的缩短。

由于蓄电池属于非线性系统,蓄电池的 SOC 与电压、电流和温度之间的关系也都是非线性的,基于以上要求,本文选择扩展卡尔曼滤波法(EKF 法),通过建立蓄电池模型,在基于复合模型对温度和电流系数进行修正,来完成对蓄电池的 SOC 的准确估算。下文将详细介绍各种估算方法,以及对扩展卡尔曼滤波法的研究。

3.1 铅酸蓄电池 SOC 的概念

当铅蓄电池工作时,一些难以确定的因素不可避免地会对蓄电池的剩余电量产生干扰。因此,如何对蓄电池进行试验以此来精确地估算蓄电池剩余电量是电源管理系统的中心问题。荷电状态(SOC)通常用于表示电量的剩余情况。

SOC 表示为蓄电池中的剩余电量,即 SOC 可以反映电池当前的使用状况。SOC 的具体估算是基于其剩余电量与容量的比率得出的^[34-35]。其公式如下:

$$SOC = \frac{Q_r}{Q_n} \times 100\% \quad (3.1)$$

式中: Q_r —剩余容量, Ah; Q_n —额定容量, Ah。

伴随着蓄电池使用时间的增加,蓄电池完全充满电的电量也会逐渐减小,因此对上述公式进行改进,改进后公式如式:

$$SOC = \frac{Q_r}{Q_a} \times 100\% \quad (3.2)$$

式中: Q_a —蓄电池完全充满电时的实际电量, Ah。

蓄电池的健康状态可以用 SOH 来表示, SOH 表示为蓄电池充满电时容量与其额定容

量的比值，其表达式如式：

$$SOH = \frac{Q_a}{Q_n} \quad (3.3)$$

在已知蓄电池的额定容量的前提下，只需要测得蓄电池的充放电量就可以得到蓄电池的 SOH 与 SOC。

3.2 SOC 计算方法分析

3.2.1 安时积分法

使用安时积分法时，不需要对电池的内部机理进行考虑，可以通过电流、温度、时间等外部特性，对其进行积分，并根据实际情况加上补偿系数，来计算出蓄电池的放电量或充电量，从而估算出电池的荷电状态。但是在实际的使用过程中，电流不是一成不变的，因此安时积分法只适用于恒流情况下。理想状态下安时积分法的计算如式：

$$SOC = \frac{Q(T_0) - \int_{t_0}^t i \eta d\tau}{Q_0} \times 100\% = SOC(t_0) - \frac{\int_{t_0}^t i \eta d\tau}{Q_0} \times 100\% \quad (3.4)$$

$$SOC(t) = SOC(t_0) - \Delta SOC \quad (3.5)$$

式中， $SOC(t)$ —在时间为 t 时的荷电状态， Q_0 —蓄电池的额定容量，Ah； $Q(t_0)$ —蓄电池开始放电前的电量值，%； i —蓄电池工作时通过电流的瞬间值，A； $SOC(t_0)$ —蓄电池放电前的 SOC 值，%； ΔSOC —时间从 t 到 t_0 时的 SOC 消耗量，%。

安时积分法估算 SOC 的方法仅仅是理想状态下的情况。它在实际操作时，有以下几个因素需要注意^[36]，如果蓄电池的初始放电量检测的不够精确，则会造成计算结果的误差变大，其次蓄电池的容量会受到温度的影响，因此如果想要使用安时积分法来估算蓄电池的 SOC 就需要解决以上问题。

3.2.2 开路电压法

开路电压法是指蓄电池长时间静置后的开路电压与蓄电池的剩余容量之间存在函数关系^[37]。开路电压法的适用范围仅仅是开路电压与蓄电池容量关系一成不变的条件下。因此对静置一定时间后的蓄电池可以用开路电压法对其容量进行测量。

随着蓄电池的使用，蓄电池会出现老化现象。蓄电池的老化由很多因素导致，比如正栅极腐蚀、不可逆的硫酸化、失水、活跃的质量退化、活性物质降解与电解质分层等^[38]。蓄电池老化后会导致蓄电池充电时端电压上升缓慢，电池温度迅速升高；在放电时，当电池容量减少时，端电压下降会加速。电池容量减少的情况。且开路电压法并不适用于处于浮充状态下的电池。

3.2.3 内阻法

内阻法是通过测量蓄电池的直流或交流电阻来确定剩余容量的，利用的是剩余容量与内阻的相关性原理，由于蓄电池具有复杂的内阻结构，因此不同的测试方法可能会导致测量结果出现差异。而且内阻值的大小会受到温度与各个蓄电池不同的差异性影响，内阻值的变化范围在蓄电池充满与满放的时候较小。如果出现较大的容量变化可能是由于微小的内阻值变化导致的，因此使用内阻法时对不同的蓄电池的剩余容量评估不能通过某一蓄电池的剩余容量与内阻之间的关系来进行评估^[39]。蓄电池在非工作的状态对直流内阻进行测量，对交流内阻的测量比直流内阻方便，对交流内阻的测量不考虑电池是否处于工作状态^[38]。同时，温度等因素的影响也需要在确定使用内阻法时进行考虑，这也是估算蓄电池剩余容量时使用内阻法需要解决的一大问题。

3.2.4 黑箱模型法

黑箱模型法是通过电池的 SOC 与一些物理参数之间的联系来估算电池的 SOC，它不需要考虑具体的数学模型。黑箱模型法在使用前需要先通过合理的方法设计出模型，然后再通过一些数据分析从而得到其中的规律，最后才能进行精确的对电池的 SOC 进行估算。

估算蓄电池的 SOC 是通过 Peuket 方程^[40-41]，但是该估算方法存在很大误差。随着对电池的 SOC 的估算方法研究的逐渐深入，通过神经网络法（ANN）来估算电池的 SOC，估算结果的精度得到了明显的提高。ANN 方法估算 SOC 需要进行大量的数据分析，研究人员将免疫遗传的算法引用进神经网络，通过这种方法来提高分析的速度和准确性^[42]。而为了提高估算出的电池剩余容量的精确性，研发人员采用了模糊控制和自适应模糊控制推理系统这两种方法达到目的^[43-44]。由于电池是属于非线性系统，因此支持向量回归法也可以通过这一方法来估算 SOC。但是由于黑箱模型法的估算方法过于复杂且需要大量的数据分析，因此并不适用于本研究，黑箱模型的 SOC 估算方法分类如图 3.1 所示。

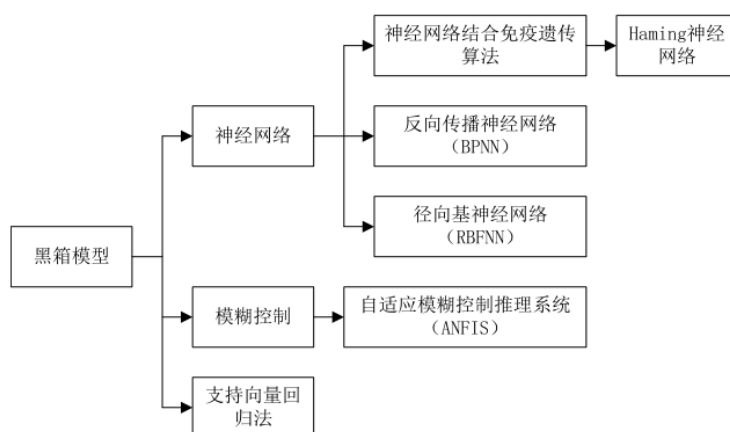


图 3.1 黑箱模型的 SOC 估算分类

Fig.3.1 Classification of SOC estimates for the black box model

3.2.5 卡尔曼滤波法

卡尔曼滤波法以最小均方误差为估测准则,采用信号与噪声的状态空间模型,结合当前状态观测值与前一时刻估计值来对状态变量进行更新,求取当前时刻的估计值,是预测修正的过程^[45]。

卡尔曼滤波法一共包含两个步骤:预测和更新。

所谓的预测,其实就是用了一个数学模型,根据当前的传感器输出值,直接依据模型来推导此时系统的状态。可以理解为其实就是使用一个方程式进行计算。

而所谓的更新,其实就是在某一时刻或某段时间内,获得一些系统的观测信息或传感器的值,甚至这些值和预测阶段的值相同,将这些值当做带噪声的真值,将这些值定义为测量值。比较此刻预测的系统状态和测量的系统状态,对预测的值进行修正。

经过不断的试验验证,研究人员发现卡尔曼滤波法可以很好的进行对电池的 SOC 进行估算。目前卡尔曼滤波法被广泛地应用于估测系统状态,它将上次状态估测值和这次的系统输入值结合起来,用迭代循环的方法来完成最小方差的估计。在蓄电池 SOC 的估测中,将蓄电池的电流及温度作为输入量,端电压作为输出量, SOC 作为状态变量,来准确的估算 SOC^[46]。

标准卡尔曼滤波算法可以准确的估测线性动态系统的状态变量。但是蓄电池属于非线性系统,蓄电池 SOC 与其电流、电压和温度等的关系都是非线性的,因此最好使用扩展卡尔曼滤波(EKF)来估测 SOC^[47]。由于电池属于非线性系统,EKF 就是采用系统状态空间模型对它进行线性化处理;接着对状态变量做最优估计,这一过程是通过标准卡尔曼滤波的迭代循环来实现的。扩展卡尔曼滤波法的系统状态空间模型方程如式所示^[48]。

$$\begin{cases} x_{t+1} = h(x_t, u_t) + \omega_t \\ y_t = g(x_t, u_t) + v_t \end{cases} \quad (3.6)$$

式中, $h(x_t, u_t)$ —非线性状态转移函数, $g(x_t, u_t)$ —非线性测量函数。

3.3 扩展卡尔曼滤波法

3.3.1 标准卡尔曼滤波法

随着传感技术、自动驾驶和机器人等技术的不断发展,对控制系统的精确度和稳定性要求也越来越高。卡尔曼滤波作为一种使用状态最优的估算方法,它得到了广泛的应用,现在经常被使用于无人机和航空航天等领域。其工作原理其实就是:一般情况下,所观测到的信号里是存在噪声的,因此只有祛除或减弱噪声的干扰才能得到实际的信号或系统状态的最优估计,而想要减少噪声的干扰就需要通过滤波的方式解决。但是有时,真正的信号有可能会被噪声吞并,所以为了得到真正的信号,就需要把信号和噪声隔开。这种方法属于线性最小方差估计,它使得信号或状态最优估计值的真正误差方差最小化,因此它是

经常使用的最优估计方法，也是最优滤波法^[49]。

使用卡尔曼滤波法时，模型的变化通过状态方程和输出方程来表示；由于系统模型在计算时，某些状态会发生改变，所以用状态方程来计算这些状态的变化量；通过输出方程来描述和系统状态有关的信息。观测信息在实际过程中会不断发生变化，因此先通过输出方程进行计算，然后观测信息对系统状态变量进行最优估计。卡尔曼滤波算法的重点就是先预测，在此前提下采用系统输入量对状态变量进行准确地校正，其步骤如式所示。

$$\text{最优估计} = \text{预测估计} + \text{算法修正} \quad (3.7)$$

使用卡尔曼滤波法进行计算时，首先要在实际系统的根本上建立其系统模型，然后对一些相关影响参数进行计算。实际系统中含有通过试验测得的输入量 u_k 和输出量 Y_k ；此外还有一个不能直接通过测量得到的状态变量 X_k 。系统模型里面包括模型状态量 x_t 和输入量 u_k ，其中输入量 u_k 和实际系统里的 u_k 一致，输出量 y_k 则是通过电池模型得知的。根据 Y_k 和 y_k 的差值，进行校正预测估计；通过上述的计算过程可以使得 x_k 逐渐贴近于 X_k ，从而最终得到准确的估算值。

现在标准卡尔曼滤波法经常被使用在对线性动态系统的状态变量准确地预算^[50]。系统状态空间模型方程如式：

$$\begin{cases} x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + \omega_k \\ y_k = C_k x_k + D_k u_k + v_k \end{cases} \quad (3.8)$$

式中： x_k —系统状态变量； y_k —输入量； u_k —输出量； ω_k —过程噪声变量； v_k —观测噪声变量； A_k 、 B_k 、 C_k 、 D_k —方程的匹配系数，用来描述系统的动态特性。在一般情况下， ω_k 、 v_k —均值为0的高斯噪声。

标准卡尔曼滤波法的计算需要对状态变量 x_k 和均方估计误差 P_k 进行估算。以 x_k 举例，假设最新的估计值 x_{k-1}^+ ，在此前提下估算出下一次的预测值 x_k^- 。在得到观测数据 Y_k 之前，先计算出预测估计值，并用“-”作为上标。在得知了 Y_k 值以后，计算出最优估计值 x_k^+ ，并用“+”作为上标。在得到了 Y_k 值以后，通过校正预测估计值 x_k^- 、 P_k^- ，最后再计算出系统最优估计值 x_k^+ 、 P_k^+ ，其计算过程如下：

第一步：状态变量 x_0^+ 、均方估计误差 P_0^+ 初始化如式：

$$x_0^+ = E[x_0] \quad (3.9)$$

$$P_0^+ = E[(x_0 - x_0^+)(x_0 - x_0^+)^T] \quad (3.10)$$

在预算过程中，状态变量的初始值是采用间接方式得知的，必然会有一些预算误差。假如此误差超出规定值，通过标准卡尔曼滤波的运算处理，能很好地接近状态实际值。

第二步：状态变量 x_t^- 、均方估计误差 P_t^- 预测估计如式：

$$x_k^- = A_{k-1} x_{k-1}^+ + B_{k-1} u_{k-1} \quad (3.11)$$

$$P_k^- = A_{k-1} P_{k-1}^+ A_{k-1}^T + D_\omega \quad (3.12)$$

在系统执行的时候, $A_{k-1}P_{k-1}^+A_{k-1}^T$ 会不断减小, 也就代表着均方估计误差的不断减小, D_ω 为过程噪声 ω_k 的误差。

第三步: 卡尔曼增益 L_k 的计算如式:

$$L_k = P_k^- C_k^T (C_k P_k^- C_k^T + D_v)^{-1} \quad (3.13)$$

式中: L_k —卡尔曼增益; D_v —观测噪声 v_k 的方差。状态估计值变动越大, L_k 的值也越大, 它的校正力度也就越大; 当状态估计值几乎保持不变时, L_k 的值很小, 相对应的校正力度也就小。

第四步: 状态变量 x_k^+ 、均方估计误差 P_k^+ 的最优估计如式:

$$x_k^+ = x_k^- + L_k(Y_k - y_k) \quad (3.14)$$

$$P_k^+ = (1 - L_k C_k) P_k^- \quad (3.15)$$

Y_k 的测量过程完成以后, 为了得到状态变量、均方估计误差的最优估计值, 就需要完成对状态变量、均方估计误差的修正, 这些都是通过标准卡尔曼滤波法来实现的。

3.3.2 扩展卡尔曼滤波法

蓄电池属于一种非线性系统, 并且其 SOC 与电压、电流和温度之间的相互联系也是非线性的。因此对电池 SOC 的估算, 可以使用扩展卡尔曼滤波法来完成, 其估算出的结果准确性高。

扩展卡尔曼滤波法的计算方法是采取系统状态空间模型, 将非线性的蓄电池系统进行线性化处理, 再接着使用标准卡尔曼滤波算法估算得出最优估算值, 其系统状态空间模型如式 (3.6) 所示。

综上所述, 扩展卡尔曼滤波法与标准卡尔曼滤波法之间存在一定关系。它们的计算流程都是先初始化, 然后再预测估算, 最后对预测值修正得到最优估算值, 因此它们具有一定的相似性。将式 (3.6) 与 (3.8) 进行对比, 可以看出扩展卡尔曼滤波法与标准卡尔曼滤波法的不同在于, 扩展卡尔曼滤波法用 $h(x_{k-1}^+, u_{k-1})$ 代替 $A_{k-1}x_{k-1}^+ + B_{k-1}u_{k-1}$, 在进行最优估算时使用 $g(x_k^-, u_k)$ 来代替 $C_k x_k + D_k u_k$ 。

3.4 对蓄电池模型的研究

通过扩展卡尔曼滤波法估算蓄电池 SOC 时, 需要通过蓄电池的充放电原理创建电池模型。通过分析系统的状态变量、非线性状态转移函数 $f(x_k, u_k)$ 以及非线性测量函数 $g(x_k, u_k)$ 可得。接下来将对几种电池模型进行详细了解, 并阐述为什么复合模型是最适合本文的模型。

3.4.1 复合模型

复合模型计算时, 状态变量 x_k 为 SOC, 输入量 u_k 为蓄电池的电流与温度, 输出量 y_k

为电压。使用泰勒级数将安时积分法的公式 (3.4) 展开, 得到如式所示^[51]。

$$x_{k+1} = x_0 - \sum_{m=0}^k \frac{\eta \Delta t}{Q_0} i_m = (x_0 - \sum_{m=0}^{k-1} \frac{\eta \Delta t}{Q_0} i_m) - \frac{\eta \Delta t}{Q_0} i_k = x_k - \frac{\eta \Delta t}{Q_0} i_k \quad (3.16)$$

再将上式 3.16 进行处理可以得到简化后的复合模型的状态方程如下式:

$$x_{k+1} = x_k - \frac{\eta \Delta t}{Q_0} i_k \quad (3.17)$$

再通过 Shepherd 模型、Unnewehr universal 模型和 Nernst 模型这三种简易模型得到此复合模型的观测方程。将这三种模型的模型函数多项式相加, 再将相加后得到的函数多项式中的相同单项式去除, 最后统一模型参数, 最终得到复合模型的观测方程如下:

Shepherd 模型:

$$y_k = E_0 - Ri_k - \frac{K_i}{x_k} \quad (3.18)$$

Nernst 模型:

$$y_k = E_0 - Ri_k + K_2 \ln x_k + K_3 \ln(1 - x_k) \quad (3.19)$$

Unnewehr universal 模型:

$$y_k = E_0 - Ri_k - K_i x_k \quad (3.20)$$

观测模型方程:

$$y_t = K_0 - Ri_t - \frac{K_1}{x_t} - K_2 x_t + K_3 \ln x_t + K_4 \ln(1 - x_t) \quad (3.21)$$

式中: i_k 一时间为 t 时的电流, A; y_k 一蓄电池工作时的电压, V; R 一固定阻值, Ω ; K_0 一蓄电池的端电压, V; K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 一蓄电池的模型系数。式中未知量 R 、 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 皆需通过最小方差法来计算获取。

3.4.2 简化模型

式 3.21 观测模型方程式中的一些单项式位置进行调整可知, 复合模型的输出方程含有两部分, 如式:

$$y_k = y_1(x_k) - y_2(i_k) = K_0 - \frac{K_1}{x_k} - K_2 x_k + K_3 \ln x_k + K_4 \ln(1 - x_k) - Ri_k \quad (3.22)$$

式中: $y_1(x_k) = K_0 - \frac{K_1}{x_k} - K_2 x_k + K_3 \ln x_k + K_4 \ln(1 - x_k)$ 一剩余电量 x_t 的函数, 称作蓄电

池的开路电压 (OCV), V; $y_2(i_k) = Ri_k$ 一充放电电流 i_k 的函数, 模型的状态方程和输出方程如式:

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k - \frac{\eta \Delta t}{Q_0} i_k \\ y_k = OCV(x_k) - Ri_k \end{cases} \quad (3.23)$$

式中： $OCV(x_k)$ — i_k 时的开路电压，V。

3.4.3 滞后效应模型与极化效应模型

滞后效应：蓄电池在静置一段时间后，端电压和开路电压之间会存在差值，导致它们并不相同。蓄电池的端电压会在放电时小于开路电压，充电时则刚好相反。同时蓄电池的 SOC 会在蓄电池使用时发生改变，这就会导致滞后效应程度的各不相同。带有滞后效应的电池模型如下式所示。

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} h_{k+1} \\ x_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F(i_k) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_k \\ x_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & (1-F(i_k)) \\ -\frac{\eta_i \Delta t}{\eta_T Q_n} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_k \\ M(x, x) \end{bmatrix} \\ y_k = OCV(x_k) - Ri_k + h_k \end{cases} \quad (3.24)$$

式中： $F(i_k) = \exp\left(-\frac{\eta_i i_k \gamma \Delta t}{\eta_T Q_n}\right)$ ； $h_k^T = [i_k, s_k]$ （放电时 $s_k = 1$ ，充电时 $s_k = -1$ ）； γ —滞后效应比例常数； $M(x, x)$ —最大滞后效应数值。

由于蓄电池的充放电电流不是一成不变的，因此端电压也会随之发生改变。端电压在发生改变时，是以非线性的形式逐渐变化的，这被称作电池的极化效应。将极化效应引进蓄电池模型，就能得到以下方程如式：

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} f_{k+1} \\ h_{k+1} \\ x_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{diag}(\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & F(i_k) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_k \\ h_k \\ x_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & (1-F(i_k)) \\ -\frac{\eta_i \Delta j}{\eta_T Q_n} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_k \\ M(x, x) \end{bmatrix} \\ y_k = OCV(x_k) - Ri_k + h_k + Gf_k \end{cases} \quad (3.25)$$

其观测方程如下式所示。

$$y_k = y_1(x_k) - Ri_k + h_k + Gf_k \quad (3.26)$$

式中： α —极点位置； f_k —低通滤波状态变量； G —低通滤波输出矩阵。

3.4.4 模型的选择

由于建立的是蓄电池的模型，而过于复杂的电池模型会导致算法的计算量增大，从而导致算法的运算效率低下，实时性差等。因此基于以上四种模型，需要选择出最适合本文的电池模型。

通过对上述四种模型进行计算量分析可以发现，简化模型的计算量是最小的，其次是

复合模型，最后是滞后效应模型和极化效应模型。因此的电池模型的选择要从这两种方案中选择。

针对这两种模型的公式，可以看出简化模型中，蓄电池的开路电压直接是通过测量得到的，而复合模型中，蓄电池的开路电压则通过对 $K_0 - K_1/x_k - K_2x_k + K_3 \ln x_k + K_4 \ln(1-x_k)$ 的计算得到数值。且由于想要对蓄电池的开路电压进行准确的估测并不是一件简单的事情，若开路电压的估测值不准确，则估算的蓄电池的 SOC 值也会产生不小的误差，因此最终对本文的电池模型的选择的是复合模型。

3.5 蓄电池初始荷电状态的确定

将蓄电池与负载断开，其端电压值则为开路电压，且开路电压与电动势数值也相差不大。且由于电动势与 SOC 之间有一定联系，因此就可以通过它们之间的关联性来求得蓄电池 SOC 的初始值。将蓄电池充完电后，将其静置一段时间，此时只要通过测量蓄电池的电压就可以得到蓄电池的电动势。因此想要精确的得到蓄电池的初始 SOC 值就需要开路电压与 SOC 之间的联系。

一般情况下，是通过恒流放电法来得出开路电压与 SOC 之间的关系。恒流放电法的原理就是每次都采用不一样的恒定电流，对蓄电池进行放电，直到蓄电池的电流被放完。此放电过程是为了得到蓄电池的开路电压和剩余容量。恒流放电时，其等效电容属于开路状态；而当蓄电池开始放电或即将放电结束时，其端电流会出现波动；但是由于使用恒流放电这种方法其放电时间长，所以这种波动一般忽略不计。下式为蓄电池恒流放电时，端电压、端电流与内阻之间的关系^[52]。

$$\begin{cases} Z_a = E - (\sum_k R_k) i_a \\ Z_b = E - (\sum_k R_k) i_b \end{cases} \quad (3.27)$$

此式中，E 为蓄电池开路状态下的端电压， i_a 和 i_b 为蓄电池在不同放电倍率下的端电流， $\sum_k R_k$ 为蓄电池的欧姆内阻和极化内阻。

对式 (3.27) 端电压、端电流与内阻的关系式进行处理得到，如下式所示。

$$Z_a - Z_b = (\sum_k R_k) i_b - (\sum_k R_k) i_a = (\sum_k i_a) \cdot (i_b - i_a) \quad (3.28)$$

对式进行整理得到下式 3.29。

$$\sum_k R_k = \frac{Z_a - Z_b}{i_b - i_a} \quad (3.29)$$

将式 3.29 代入式 3.27 中，就可以得到蓄电池的端电压与电动势之间的关系式如下：

$$E = Z_a + \frac{Z_a - Z_b}{i_b - i_a} \cdot i_a \quad (3.30)$$

依据上式，再根据对蓄电池的恒流放电试验，将测得的蓄电池的端电压来代替开路电压输入上式获得蓄电池 SOC 的初始值。

3.6 扩展卡尔曼滤波法的复合模型修正

蓄电池的充电和放电时，其剩余容量可能会因电流和环境温度等而变化。因此需要引入等效电流和温度系数来修正复合模型的状态方程。

3.6.1 等效电流系数

通过不同的电流对充满电的蓄电池进行放电，得出蓄电池的电量耗尽的时候蓄电池释放的电量也不同。由于蓄电池 SOC 估算值需要其准确度，因此需要准确地知道电流与蓄电池放电的电量之间的关系。这一关系可以通过 Peukert 来计算得出，如下式所示^[53, 54]。

$$I^n t = \text{Const} \quad (3.31)$$

式中：I—放电电流，A；t—充满电的蓄电池持续放电至终止时的时间，min；n—电池相关常数；Const—蓄电池相关活性物质常数。

将 $Q_i = It$ 带入到上式，可以得出电流在 i 时的可用容量，如式所示。

$$Q_i = \text{Const} \times I^{1-n} \quad (3.32)$$

再通过对标准放电电流 I_a 和实际的放电电流 I_b 进行测试，代入到式 (3.30) 中得到式 (3.33)：

$$n = \frac{\lg t_b - \lg t_a}{\lg I_a - \lg I_b} \quad (3.33)$$

将式 (3.32) 代入到式 (3.30) 中可得等效电流系数 n 如下式所示。

$$n = \frac{Q_a}{Q_b} = \frac{I_a^{1-n}}{I_b^{1-n}} \quad (3.34)$$

3.6.2 温度系数

随着温度的上升，蓄电池的容量会有所增加，因此温度也会对 SOC 估算的准确性造成影响。在试验时，一般先使用红外温度计测得蓄电池的温度，然后再对测出的数据进行处理，得到蓄电池的温度系数。根据温度系数对 SOC 估算的复合模型进行更正，从而使估算出的蓄电池的 SOC 值更加准确。

蓄电池温度与容量的关系一般用经验公式来描述，如式所示。

$$Q_T = Q_{20} [1 + m_T (T - 20)] \quad (3.35)$$

式中： Q_T — T 时的蓄电池容量，Ah； Q_{20} —温度为 20 摄氏度时的容量，Ah； m_T —常数；温度系数 n_t — $[1 + m_T(T - 20)]$ 。

3.6.3 修正后的复合模型

将等效电流系数 n_t 与温度系数代入式（3.17），可得修正后复合模型的状态方程和观测方程如式所示。

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k - \left(\frac{n_t n_i \Delta t}{Q_0} \right) i_k + \omega_k \\ y_k = K_0 - R i_k - \frac{K_1}{x_k} - K_2 x_k + K_3 \ln(1 - x_k) + v_k \end{cases} \quad (3.36)$$

该方程可以合理的反应蓄电池的内部结构和工作性能。

3.7 基于复合模型的 EKF 法估算蓄电池 SOC

本文为了准确的估算出蓄电池的 SOC，使用的是基于复合模型的扩展卡尔曼滤波法。先建立好电池模型，在进行对模型的电流和温度参数修正，将电池的状态观测模型进行映射近似化，这样估算出来的 SOC 值准确度更高。其计算的过程如式所示。

首先是对模型的建立：

$$\begin{cases} x_{k+1} = h(x_k, u_k) + \omega_k = x_k - \left(\frac{\eta_i \eta_T \Delta t}{Q_0} \right) i_k + \omega_k \\ y_k = g(x_k, u_k) + v_k = K_0 - R i_k - \frac{K_1}{x_k} - K_2 x_k + K_3 \ln x_k + K_4 \ln(1 - x_k) + v_k \end{cases} \quad (3.37)$$

其次是对动态特性匹配系数的确定。由于蓄电池属于非线性的系统，蓄电池的 SOC 与电压、电流和温度的变化也都是非线性的，因此本文采用 EKF 法将非线性的蓄电池系统进行线性化处理，再将线性化处理后的模型根据标准卡尔曼滤波法对蓄电池 SOC 进行估算。将蓄电池的状态方程与观测方程通过泰勒公式展开，并且利用 Jacobin 矩阵来得出模型的匹配系数。

泰勒级数公式：用无限项连加式，级数表示为一个函数，这些相加的项就是有函数在某一点时的导数求得的。

Jacobin 矩阵：由于在映射的过程中，需要描述不同函数变量间的变化速度导数，而 Jacobin 矩阵则是提供了一种表达局部输出对输入的敏感度方法，说到底就是提供了一个分析神经网络输入到输出的数学框架。

其中状态过程的动态特性匹配系数如下式：

$$A_k = \frac{\partial h(x_k, u_k)}{\partial x_k} = 1 \quad (3.38)$$

$$B_k = \frac{\partial h(x_k, u_k)}{\partial x_k} = -\frac{\eta_i \eta_T \Delta t}{Q_0} \quad (3.39)$$

观测方程的动态匹配系数表达式如下式：

$$C_k = \frac{\partial g(x_k, u_k)}{\partial x_k} = \frac{K_1}{(x_k^-)^2} - K_2 + \frac{K_3}{x_k^-} - \frac{K_4}{1-x_k^-} \quad (3.40)$$

$$D_k = \frac{\partial g(x_k, u_k)}{\partial u_k} = -R \quad (3.41)$$

系统输入求解表达式如下式：

$$u_k = i_k \quad (3.42)$$

上述的过程是为了将非线性化的电池模型进行线性化处理，从而得出电池的空间状态模型如式（3.8）所示。

算法初始化的初始值：

$$x_0^+ = SOC_0 \quad (3.43)$$

$$P_0^+ = \text{var}(x_0) \quad (3.44)$$

状态变量的预测：

$$x_k^- = x_{k-1}^+ - \left(\frac{\eta_i \eta_T \Delta t}{Q_0} \right) i_{k-1} \quad (3.45)$$

观测变量的预测：

$$y_k = K_0 - R i_k - \frac{K_1}{x_k^-} - K_2 x_k^- + K_3 \ln x_k^- + K_4 \ln(1-x_k^-) \quad (3.46)$$

均方估计误差的预测：

$$P_k^- = A_{k-1} P_{k-1}^+ A_{k-1}^T + D_\omega \quad (3.47)$$

卡尔曼滤波增益：

$$L_k = \frac{P_k^- C_k^T}{C_k P_k^- C_k^T + D_v} \quad (3.48)$$

状态变量的最优估计：

$$x_k^+ = x_k^- + L_k (Y_k - y_k) \quad (3.49)$$

均方误差最优估计：

$$P_k^+ = (1 - L_k C_k) P_k^- \quad (3.50)$$

t=1、2、3、4.....

通过上次测量的 SOC 与开路电压值可以估算出 SOC_0 ， P_0^+ 为均方估计误差的初始数值， x_k^+ 为状态变量的最优估测值， x_k^- 为状态变量的预测值， P_k^+ 为状态均方误差的最优估

计方差矩阵, P_k^- 为状态均方误差的预测方差矩阵, D_ω 为过程噪声的误差, D_v 为观测噪声的误差。

3.7.1 实验分析

为了验证基于复合模型的扩展卡尔曼滤波法估算蓄电池 SOC 的准确性, 本文通过对拖拉机进行起动试验, 将 EKF 法估算的蓄电池 SOC 与智能蓄电池检测仪测得的 SOC 进行对比, 判断其误差值。

实验采用的是 SOH 为 64% 的骆驼牌蓄电池, 将其充满电, 断开其与发电机的连接, 使其电量仅供起动机起动, 测得实际试验所得 SOC 值与算法估算值。将二者通过 Matlab 拟合如图 3.2 所示。

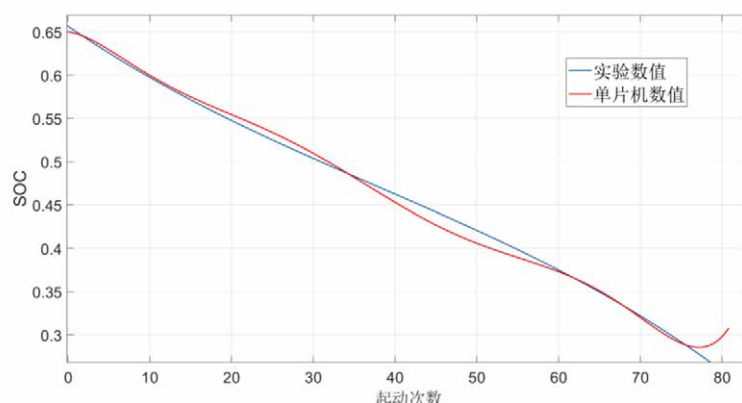


图 3.2 骆驼牌蓄电池 SOC 拟合

Fig. 3.2 Camelot battery SOC fit

根据拟合图可以看出, 随着起动次数的增加, 单片机估算的蓄电池 SOC 可以贴近于实际测得的 SOC, 且两者的误差范围很小。因此得出使用基于复合模型的扩展卡尔曼滤波法可以准确的估算出蓄电池的 SOC。

以上则为使用扩展卡尔曼滤波法估算蓄电池 SOC 的全部内容。下文将在完成基于单片机对拖拉机电源管理系统的监控与控制硬件电路设计和软件流程图设计的基础上, 开始进行试验部分, 此时将实测测出来的蓄电池的 SOC 与算法估算出来的 SOC 进行误差分析, 从而得到拓展卡尔曼滤波法的 SOC 估算误差度。

3.8 本章小结

本章首先对几种蓄电池 SOC 的估算方法进行简介, 然后分析优缺点, 最终确定了本文估算蓄电池 SOC 的方法为扩展卡尔曼滤波法, 电池模型使用的是复合模型。紧接着介绍了获得蓄电池开路电压的方式与获得等效电流系数与温度系数对电池模型进行修正。基于修正后的复合模型通过扩展卡尔曼滤波法估算蓄电池的 SOC。

第四章 拖拉机电源监测管理系统的总体设计

上文完成了对扩展卡尔曼滤波法的研究,本章将完成基于单片机监控的拖拉机电源管理系统的硬件电路设计与软件流程图设计。本文采用的是 STM32F103C8T6 单片机来代替传统的电压调节器,使其不仅能够控制发电机的输出电压,同时还可以监测蓄电池的电压、温度和电流,并在蓄电池电量不足的情况下,通过继电器切断其他电源的使用,从而确保蓄电池的剩余电量能保证拖拉机正常的三次启动。在此基础上,还完成了 RS485 的通讯模块设计。

4.1 拖拉机电源监测系统整体设计

本文的对拖拉机电源管理系统的监控一共分为两部分,一部分是对发电机的输出电压的控制与监测,另一部分则是对蓄电池的监测。对发电机的输出电压的监控是将需要用单片机实现电压调节器的功能,将发电机的输出电压控制在合理范围内,且在蓄电池电量不足的情况下,切断非必要用电件的电量使用;而对于蓄电池的监测则是需要监测蓄电池的电压、电流和温度,从而准确的估算出蓄电池的 SOC 值。本设计是通过控制发电机励磁绕组的通断来控制发电机电压,通过电阻分压的方式对发电机和蓄电池的电压监测,对蓄电池的电流监测使用的是 LA200-P 霍尔式传感器,而对蓄电池的温度监测则是通过温度传感器 DS18B20 来测量,信号输出则是选择的 RS-485 接口来进行通信。

4.2 电源模块设计与单片机选型

4.2.1 控制器芯片的选择

本研究不仅需要使用单片机监测发电机的电压和蓄电池的温度、电压、电流,还需要使用单片机来完成对蓄电池的剩余电量的估算。由于对蓄电池的剩余电量的估算需要使用算法,这就需要所选择的单片机必须能够完成快速且大量的运算。而 51 单片机对算法的运算速度达不到试验的要求,因此本文选用稳定性更高、功率也更高的 STM32F103 系列单片机作为核心控制芯片。

STM32F103C8T6 是一款拥有 ARM32 位 Cortex-M3,最高拥有 72MHZ 工作频率的高性能处理器,它具备很好运算能力,并且有着很高的实时性。STM32F103C8T6 芯片有着以下的特点:

STM32F103C8T6 的工作电压为 2.0-3.6V,它拥有多达 80 个快速 I/O 端口,且绝大多数的端口可以接受 5V 的信号,这就使得它可以连接更多的外围电路以实现更多的功能;

它还具备 1 个 12 位模数转换器（ADC），可转换范围为 0-3.6V；7 个 DMA 控制器，可支持 USART、SPI 和定时器等外设；多达 4 个定时器，可用于 PWM 和输出比较。其最小系统电路图及其复位电路如图 4.1 所示。

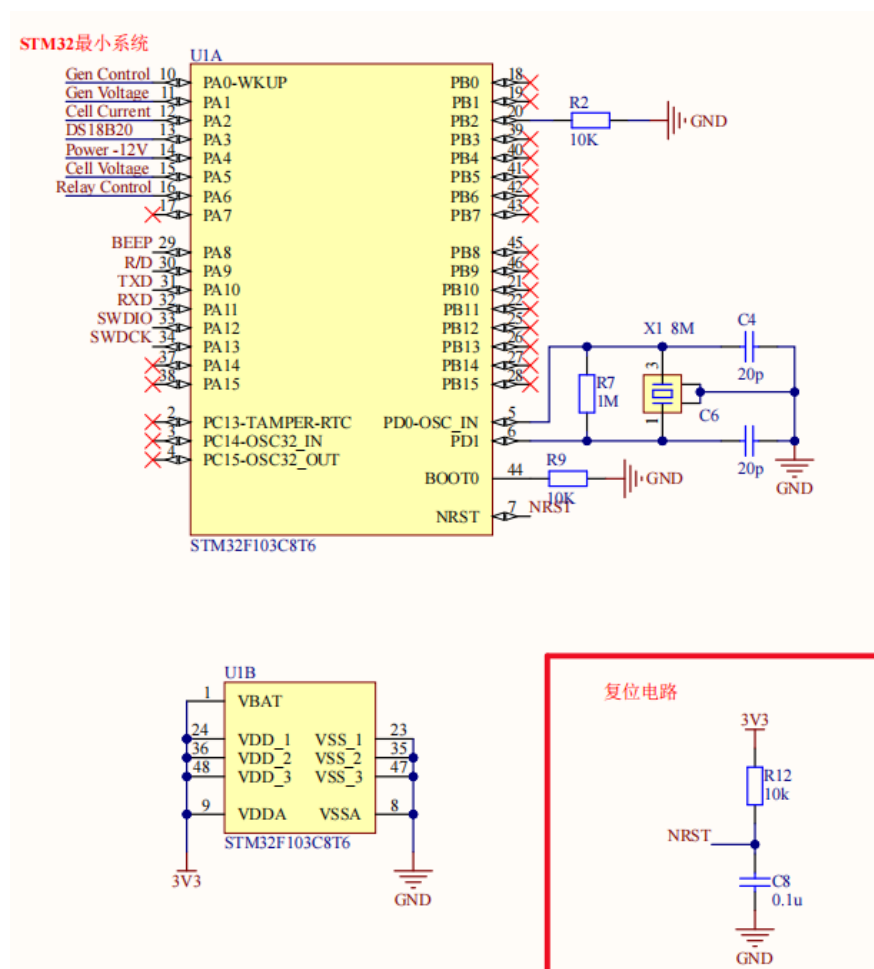


图 4.1 STM32F103C8T6 最小系统电路图

Fig.4.1 STM32F103C8T6 minimum system circuit diagram

4.2.2 电源模块电路设计

蓄电池作为拖拉机电源管理系统里的重要电源，承担着在起动机启动时的供电作用。本文由于采用单片机来代替的传统的电压调节器，故单片机需要承载来自于蓄电池输出的电压，由于蓄电池的在充满电后的电压可能高于 12V，因此采用了一个型号为 LM7812 的 12V 三端稳压器。当 LM7812 的输入低于 12V 时，仅仅会产生一个微弱的压降，此时 5V 的 AMS1117 稳压器输出依旧不变，来维持控制电路的继续工作。如图 4.2 所示。

由于 32 单片机所需求的电压为 3.3V，且外接的霍尔电流传感器和温度传感器则需要 5V 的电压，因此为了获得不同模块所需要的电压值，就需要对蓄电池输出的 12V 电压进行分段降压。

本文采用的是两个 AMS1117 稳压器，AMS1117 是一款三端线性稳压器，它的三个端

口可调节或固定输出电压。其优势就在于允许输入电压在一定幅值内进行变化，其输出电压都稳定为所需电压值。如图 4.3 所示，使用一个 AMS1117-5V 芯片将蓄电池输入的+12V 电压转换为+5V 电压，再接着使用一个 AMS1117-3.3V 将+5V 电压转换为+3.3V 电压，如图 4.4 所示。这样单片机就可以通过这些转化后的低电压来实现主控单元和电路检测的功能。

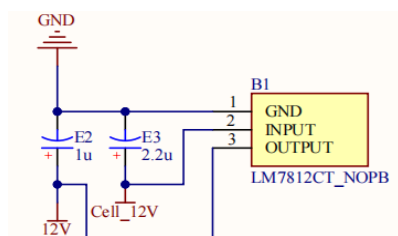


图 4.2 12V 稳压器

Fig. 4.2 12V voltage regulator

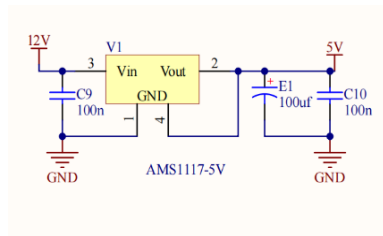


图 4.3 +12V 到+5V 转换电路

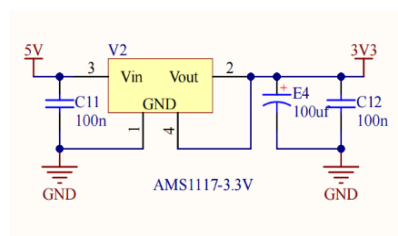
Fig. 4.3 +12V to +5V
conversion circuit

图 4.4 +5V 到+3.3V 转换电路

Fig.4.4 +5V to +3.3V conversion
circuit

由于本试验研究需要对蓄电池进行监测，而对蓄电池的电流检测传感器则需要一个 -12V 的电源，因此还需要设计出一个生成 -12V 的电路。如图 4.5 所示，使用了两个型号为 SS8050 的 NPN 三极管以及一个型号为 SS8550 的 PNP 三极管。单片机生成波形来控制这个电路，由于三极管工作在饱和状态，利用二极管的单向导通性、逆向截止性和电容的存储电量的特性来生成一个 -12V 的电压。

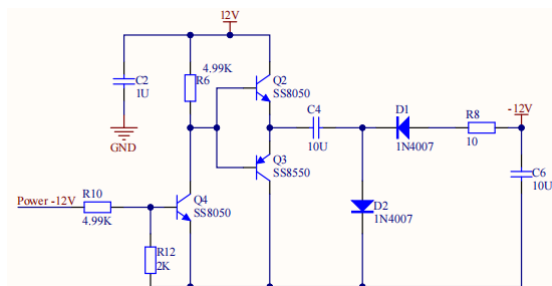


图 4.5 -12V 电压的生成

Fig.4.5 -12V generation

在电源的电路设计加入了一个 LED 灯来判断系统的供电情况，如图 4.6 所示。由于电源在供电过程中会受到电池质量、电路设计、元器件误差等多因素的影响，供电电压会产生纹波，因此加入一个滤波电路，并联四个 0.1u 的电容，利用的是电容的频率阻抗特性来过滤掉电源中的干扰，如图 4.7 所示。

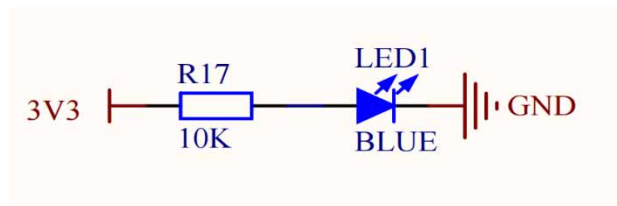


图 4.6LED 灯

Fig.4.6 LED lights

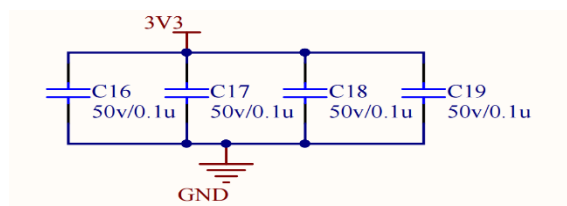


图 4.7 滤波电路

Fig.4.7 Filter circuit

4.3 发电机电压控制及监测电路的设计

4.3.1 控制发电机电压

发电机的输出电压大小取决于发电机定子线圈的匝数、发电机的转速和转子线圈产生磁场的强度，而只能调节转子线圈产生磁场的强度来调节电压。经过实验室汽车电器万能试验台测得当硅整流发电机转速为 1800r/min 时，其输出电压可达到 20V，而蓄电池所需的安全充电电压为 12.8V-13.8V 之间。经过汽车电子万能试验台测得发电机正常发电时的转子供电电流为 1.2A，安全峰值为 5A；转子的供电工作电压在 12.8V-13.8V 之间。由于单片机需要控制开关的电压与电流过大，因此本文采用了一个大功率三极管 TIP41C，其特点为集电极最大允许电流与电压和耗散功率较高，符合受控电路的物理参数。由于需要将发电机的输出电压保持在 12.8V-13.8V，所以当发电机电压高于 13.8V 时，三极管截止，励磁线圈磁场强度减弱，发电机电压下降；当发电机电压低于 12.8V 时，三极管导通，励磁线圈磁场强度增强，发电机电压升高。但是由于三极管 TIP41C 为 PNP 型三极管，且 TIP41C 的射极-基极饱和电压为 2V，所以想要将电枢绕组电压控制在 12.8V-13.8V，需要在三极管基极提供一个 12V 的控制电压，当基极电压为 12V 时三极管导通，当基极电压为 0V 时，三极管截止。因为单片机引脚电压不足以击发基极，因此再运用了一个型号为 SS8550 的三极管来击发 TIP41C 触发电压。由于大功率电路在工作时可能会产生反向电流烧毁单片机控制引脚，因此在单片机控制发电机电压的引脚中，串联了一个光耦，型号为 TLP181，其起到隔离作用，保护单片机引脚。如图 4.8 所示。

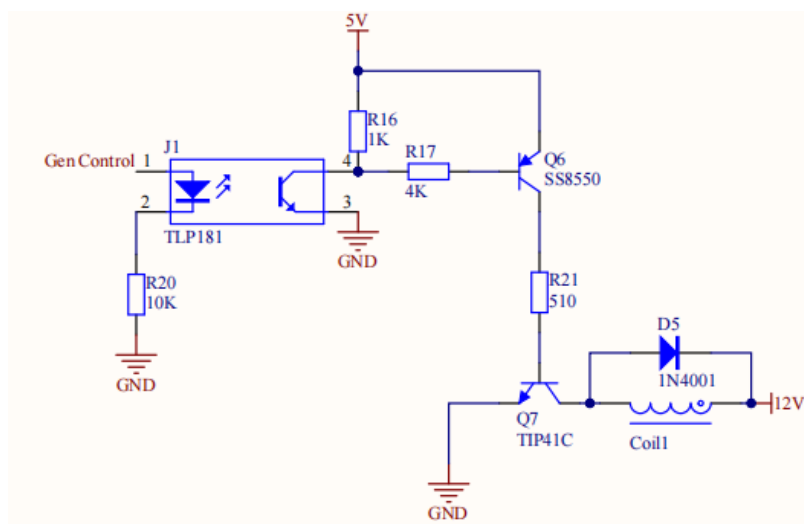


图 4.8 发电机电压控制模块

Fig.4.8 Generator voltage control module

4.3.2 发电机的电压采集电路

检测发电机的电压采用的是电阻分压的方法，采取的是一个 1K 的电阻和一个可调的

10K 电阻来进行分压，从而得出发电机的输出电压。如图 4.9 所示。

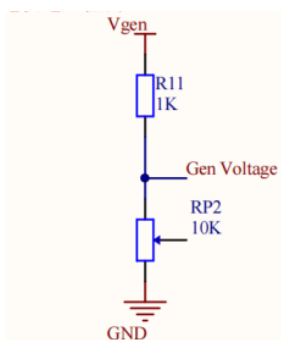


图 4.9 电压采集电路

Fig.4.9 Voltage acquisition circuit

4.4 蓄电池监测系统的硬件电路

4.4.1 蓄电池的电压采集模块

对蓄电池的电压采集和对发电机的电压采集一样，同样是采取的是串联两个电阻，一个 1K 的电阻和一个可调的 10K 电阻。如图 4.10 所示。

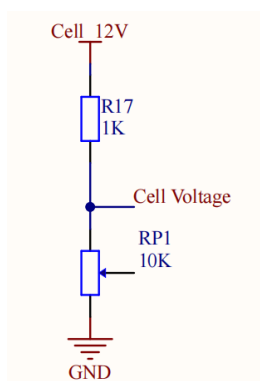


图 4.10 蓄电池的电压采集电路

Fig.4.10 Voltage acquisition circuit for the battery

4.4.2 蓄电池的电流采集模块

蓄电池的监控系统需要监测其工作时的电流的大小来实现对蓄电池的剩余电量的精确估算。本文选择的是传感器 LA200-P 来检测蓄电池的电流。LA200-P 是使用霍尔效应的传感器，它拥有精确的测量精度、良好的抗干扰性，因此它被普遍用于电路的电流测试中。LA200-P 的工作电压正常在 $\pm 12\text{V}$ 至 15V ，具有很强的适用性。

本试验中，由于蓄电池的充放电是双向的，霍尔式的电流传感器对电流的采集是以电压的形式输出的，因此会存在正负的信号差。如图 4.11 所示，在电流采集电路中加入了绝对值处理部分，当传感器采集到的电压信号为 $+U$ 时，通过运放放大器通过选用合适的电阻，使得输出的电信号方向相同并且数值相等；当传感器采集到的电压信号为 $-U$ 时，通

过运放放大器反向放大，从而得到反向的电压信号。

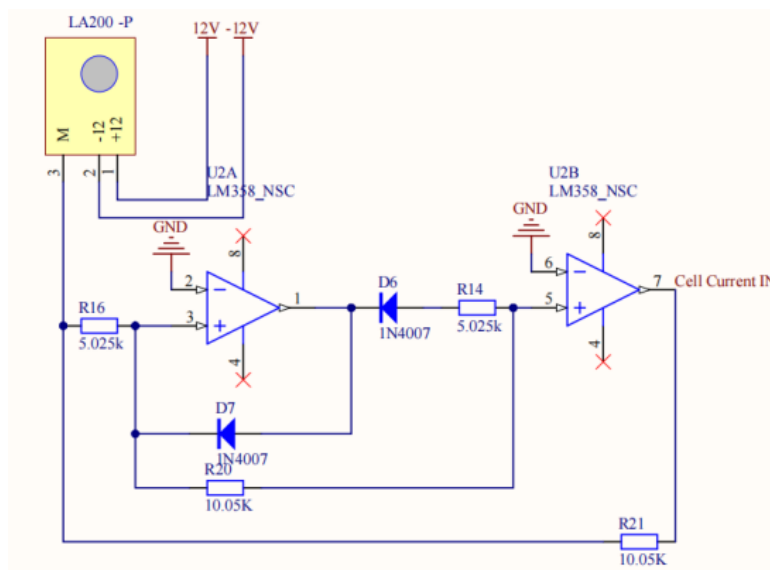


图 4.11 蓄电池电流采集模块

Fig.4.11 Battery current acquisition module

STM32F103C8T6 中的 A/D 采样模块的电压范围为 0-3.3V，若是直接将输出的电压传送给 A/D 口前，必须先对电路进行降压处理与运放隔离。其电路图如图 4.12 所示。

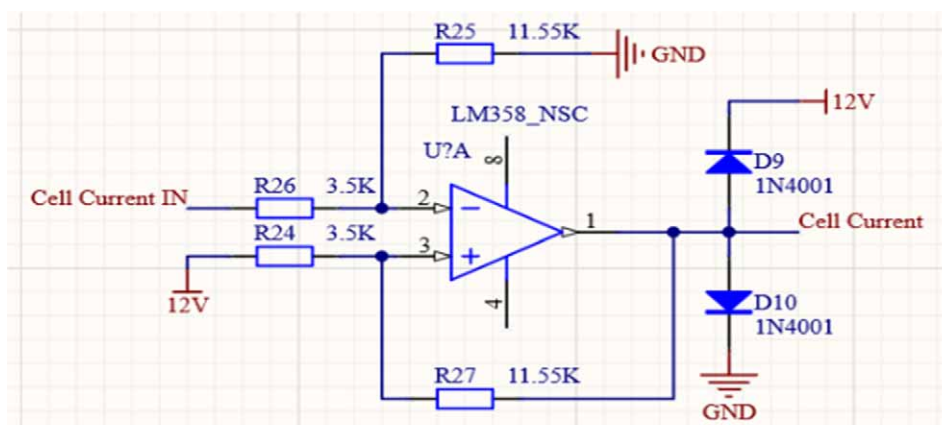


图 4.12 电流处理电路图

Fig.4.12 Current handling circuit diagram

4.4.3 蓄电池的温度采集模块

温度检测主要用于检测蓄电池工作时的温度，由于蓄电池的密封性较好，不易测得其内部的温度，而蓄电池的接线柱是金属材质的且直接与蓄电池的内部电解液相连，因此本文采取的是通过测蓄电池接线柱的温度从而间接的反应蓄电池的内部温度。如图 4.13 所示。

本文对温度传感器的选型为 12 位的数字型温度传感器 DS18B20，它的通讯方式为单线通讯，仅需一个接口与微处理器相连就可以实现微处理器与 DS18B20 的双向通讯，同

时它还具有测温范围广、精确度高和体积小等优点。

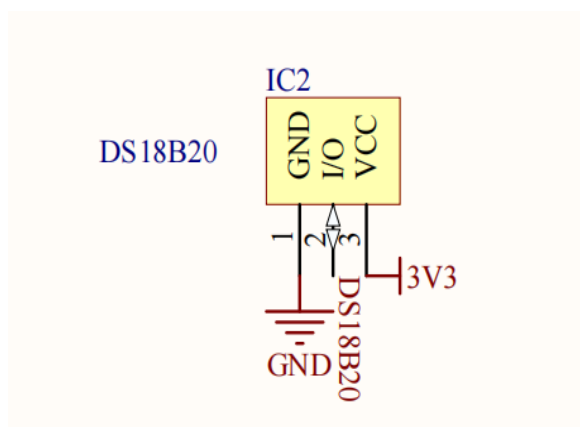


图 4.13 蓄电池温度采集模块

Fig.4.13 Battery temperature acquisition module

4.5 通信模块电路设计

单片机常用的通讯方式有 I²C 总线、USART 串口、SPI 总线、CAN 总线等。本文将在这些通信方式中选择出最适合本试验的通信方式。

I²C 总线的速度分为三档：低速模式、快速模式和高速模式，但是在实际使用中，快速模式和高速模式下，经常会出现总线卡死的情况，因此 I²C 总线通讯现在被用于低速通讯。

SPI 总线在高速通信上有很大的优势，但是受制于控制从设备的 I/O 端口的数量，总线上不可以挂接从设备。

CAN 则是一种经常被使用在汽车电子上的高级总线，但是由于其复杂性和 STM32F103 单片机上仅有一个 CAN 接口，需要加一个 CAN 收发器芯片才能正常使用，因此 CAN 总线这种通讯方式在本试验中不作使用。

本文采用的一种基于 USART 串口的扩展接口，叫做 RS485。使用 RS485 接口的原因是拖拉机正常的工作范围是在田间，因此必须选择通信长度长的方式，而 RS485 则可以很好的满足这一条件，因为它的通信长度可以达到 1000m。除此之外，RS485 的传输速度也很快，还可以挂接多个设备，满足一对多的通信方式，因此使用 RS485 串口来进行通信是最优选择。如图 4.14 所示，RS485 通信电路主要用于主控端和蓄电池单体模块的通信，本文采用的 485 通信芯片为 Sipex 公司的 SP3485 型号芯片。此型号由+3.3V 供电，其功耗低，且满足 RS-485 串行协议的要求。

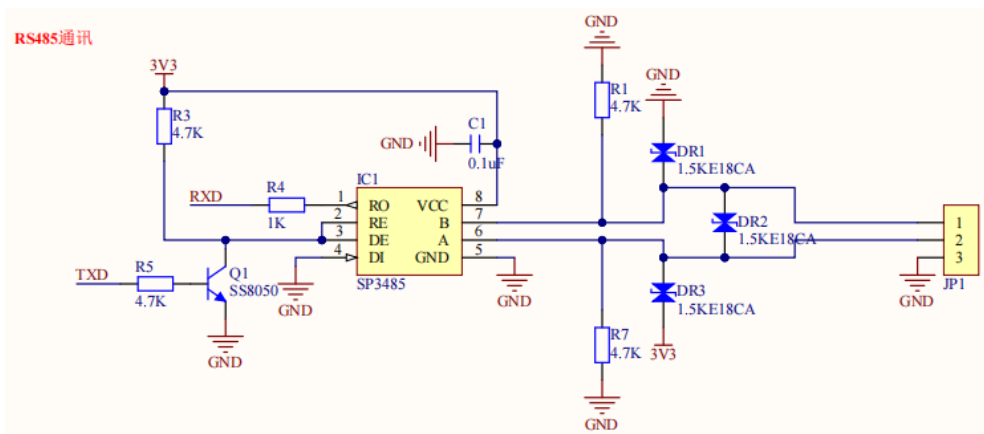


图 4.14 RS485 通讯电路

Fig.4.14 RS485 communication circuit

4.6 监测系统的整体软件设计流程

本文的主要研究内容是基于单片机对拖拉机电源管理系统的研究，而拖拉机机的电源管理系统分为发电机、电压调节器和蓄电池这三个部分。由于使用单片机代替电压调节器来控制发电机电压，因此单片机在本次研究的监测也分为两部分，一部分是对发电机电压的监测，一部分是蓄电池的电压、电流和温度参数的监测，并将监测得到的相关数据进行蓄电池 SOC 估算，最后将数据上传至上位机。

4.6.1 单片机控制发电机电压流程

经过试验测得发电机的发电电压范围在 12.8V-13.8V 之间，因此发电机的输出电压范围就给定为 12.8V-13.8V，当发电机输出电压大于 13.8V 时，单片机控制一个大功率的三极管闭合，从而使电枢绕组断开，发电机输出电压下降；当发电机的输出电压小于 12.8V 时，单片机控制三极管断开，从而导致发电机输出电压变大。其流程图如图 4.15 所示。

4.6.2 蓄电池的数据采集及通讯流程

想要准确的估算出蓄电池的 SOC，就需要先测量蓄电池的相关数据，得到其电压、电流和温度的变化值。由于蓄电池温度变化速度慢，因此这里采用分段测量的方法，先测量蓄电池的电压和电流，然后再对蓄电池的温度进行测量。将数据采集后通过通讯模块将数据上传到上位机。

4.6.3 SOC 估算及监测流程

为了使该监控系统能准确的估算 SOC 值，设计了如图 4.16 的流程图。通过此流程先对蓄电池的电压、电流与温度参数进行测量，基于复合模型的扩展卡尔曼滤波法来对蓄电池的 SOC 进行估算，得到每次起动时蓄电池的剩余电量。

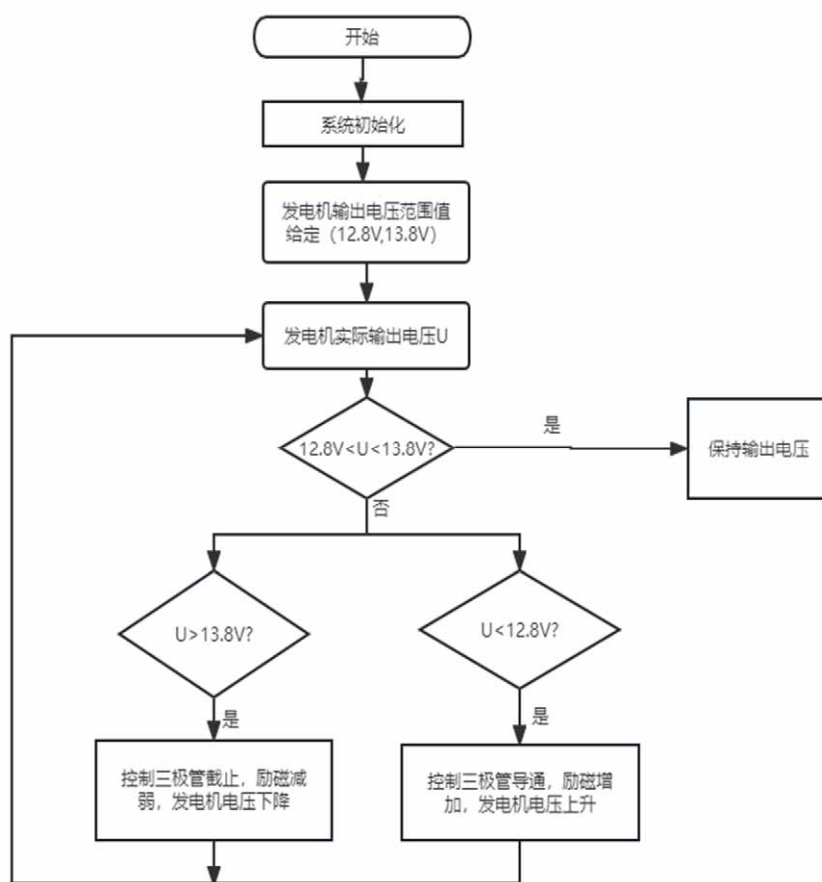


图 4.15 控制发电机电压流程图

Fig.4.15 Flow chart for controlling generator voltage



图 4.16 蓄电池 SOC 估算流程图

Fig.4.16 Flow chart for battery SOC estimation

4.7 基于硬件电路设计的实物

根据上文对各个模块的硬件电路设计，完成了其整体硬件电路的设计。如图 4.17 所示。

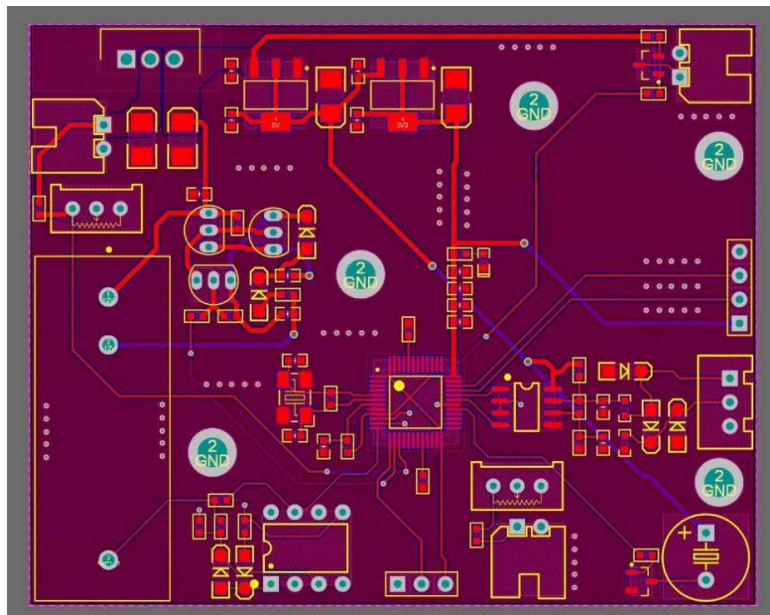


图 4.17 硬件电路设计

Fig. 4.17 Hardware circuit design

基于硬件电路图，设计出了 STM32F103C8T6 实物，如图 4.18 所示。该实物不仅可以很好的控制发电机的电压在 12.8-13.8V 之间，同时还可以实时监测蓄电池的电压、电流与温度。

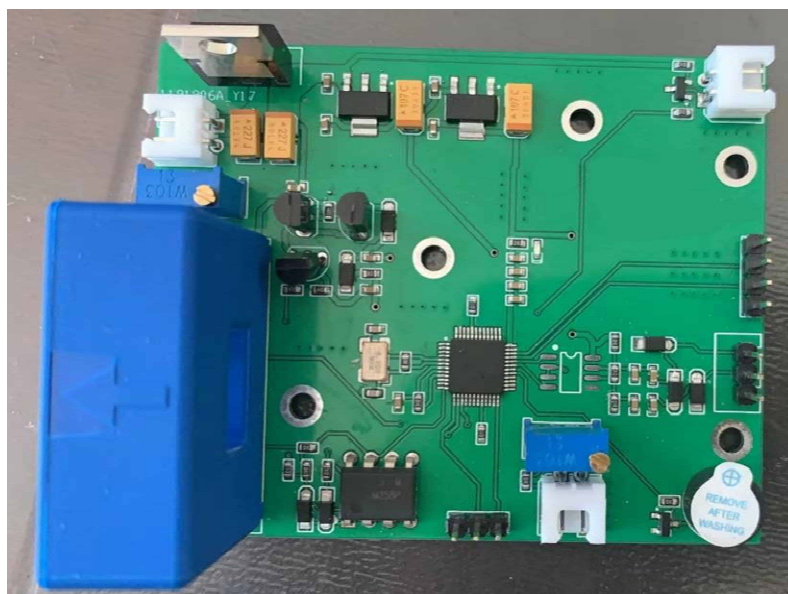


图 4.18 实物图

Fig.4.18 Physical drawing

4.8 本章小结

本章设计了 STM32F103C8T6 单片机控制拖拉机电源管理系统的硬件电路与软件流程。其中设计了电源模块、对发电机电压的控制与监测模块、对蓄电池电压、电流和温度监测模块与通信模块，并完成软件流程设计，制作实物。

第五章 基于单片机监控的拖拉机电源管理系统试验

为了验证基于单片机监测拖拉机电源管理系统的可行性,本试验分为两部分。一部分为单片机控制发电机电压,先通过试验室的汽车电子万能试验台,使用示波器来测得传统的电压调节器控制发电机的电压波形,得到其控制的输出电压的范围;再根据上文第四章的硬件电路使用 Matlab 里的 Simulink 仿真来模拟单片机控制的发电机电压波形,最后用单片机代替电压调节器,通过示波器测得其控制发电机的电压波形,对上面三个波形显示出的电压范围进行对比从而验证单片机代替传统电压调节器控制发电机电压的可行性。

另一部分为对蓄电池电压、电流和温度的监测。此试验是对拖拉机进行启动试验,将拖拉机发电机卸下,使蓄电池的电量仅供拖拉机起动机启动,通过智能蓄电池检测仪测得蓄电池的电压、电流和 SOC 值,红外温度检测仪来测得蓄电池的温度变化,将这些数值与单片机监测的数值进行对比,通过对比验证单片机监控的蓄电池各项参数准确性,再将基于复合模型的 EKF 法估算的蓄电池 SOC 与智能蓄电池检测仪测得蓄电池 SOC 进行对比,从而验证基于复合模型的扩展卡尔曼滤波法估算蓄电池 SOC 的精确度,再通过 Matlab 拟合得出 SOC 估算的误差范围。试验使用三个型号不相同的蓄电池,对拖拉机进行启动试验,最终将测得的起动机还能启动三次的 SOC 数值进行对比,取一个最大值,此数值为在大多数情况下,蓄电池的剩余容量在此数值时,拖拉机还能够维持正常的三次启动。

5.1 单片机控制发电机电压试验

5.1.1 发电机输出电压的确定

本文使用单片机来代替传统的电压调节器来控制发电机的发电电压,因此就需要先测量得到发电机发电时的输出电压范围,从而根据此范围设计单片机控制的发电机输出电压也应在此范围内。试验通过试验室内的汽车电器万能试验台来实现,通过示波器测得其波形,从而得到其控制的发电机输出电压范围。

5.1.2 基于电压调节器控制的发电机电压

为了得到发电机的输出电压范围,使用内阻为 $2.46\text{k}\Omega$ 的 JFT149T 的 14V 电压调节器通过示波器测得传统的电压调节器控制的发电机电压的波形,通过波形得到其电压范围。电压调节器如图 5.1 所示,汽车电器万能试验台试验如图 5.2 所示。

使用汽车电器万能试验台进行试验,通过示波器得到传统的电压调节器控制的电压波形图,将其波形图导出来如图 5.3 所示,通过波形图可以得到发电机正常发电时,电压调节器将其电压控制在 12.8-13.8V 之间。由于使用单片机控制发电机输出电压时,需要对三

极管的型号进行选择, 因此还需要测得发电机正常发电时, 转子的供电电流。如图 5.4 所示, 通过汽车电器万能试验仪测得发电机正常发电时, 转子的供电电流为 1.2A, 峰值为 5A, 因此本文控制发电机电压时, 三极管选型选择的是大功率三级管 TIP41C。



图 5.1 电压调节器

Fig. 5.1 Voltage regulator



图 5.2 汽车电器万能试验台测电压图

Fig. 5.2 Automotive electrical universal test bench voltage measurement diagram

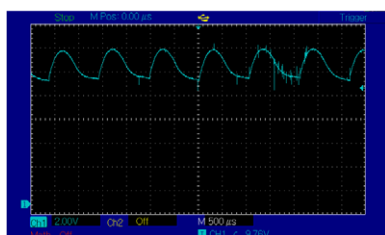


图 5.3 电压调节器控制的电压波形

Fig.5.3 Voltage waveforms controlled by voltage regulator



图 5.4 转子供电电流

Fig. 5.4 Rotor supply current

5.1.3 基于 Simulink 对发电机输出电压的仿真

硅整流发电机正常工作时, 其产生的三相交流电通过整流器进行三相桥式全波整流后转变为直流电。通过 Matlab 里的 Simulink 模块对硅整流发电机的三相桥式整流电路进行仿真, 如图 5.5 所示。

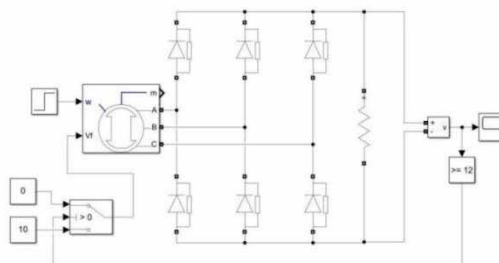


图 5.5 Simulink 仿真电路

Fig. 5.5 Simulink simulation circuit

通过 Simulink 对发电机的输出电压仿真, 得到如图 5.6 所示的波形, 根据波形可以得出 Simulink 仿真出来的波形将发电机的输出电压控制在 12.8-13.8V 之间, 由此可以得出

在理论上单片机代替电压调节器来合理的控制发电机的输出电压是可行的。

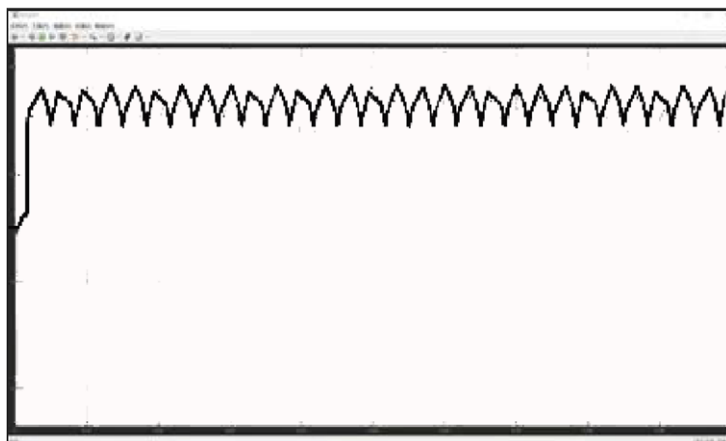


图 5.6 Simulink 仿真波形

Fig. 5.6 Simulink simulation waveform

5.1.4 基于单片机控制的发电机电压

通过 Simulink 仿真可得,单片机可以控制发电机的输出电压在 12.8-13.8V 之间。因此可以通过试验验证其可行性。将设计好的 STM32 单片机实物代替电压调节器通过汽车电器万能试验台来进行测试,通过示波器测得其控制电压的波形。试验过程如图 5.7 所示,单片机接线如图 5.8 所示,波形图如图 5.9 所示。



图 5.7 试验过程

Fig. 5.7 Experimental procedure

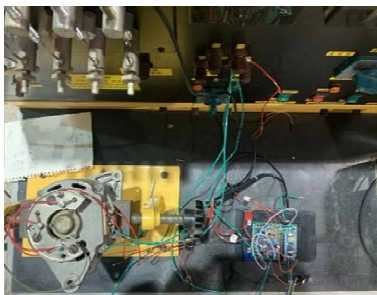


图 5.8 单片机接线图

Fig. 5.8 Microcontroller wiring diagram

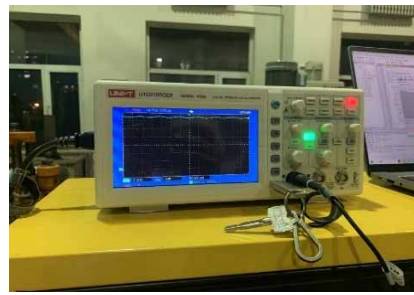


图 5.9 单片机控制发电机电压波形

Fig. 5.9 Microcontroller controlled generator voltage waveform

根据图 5.9 单片机控制发电机的波形,发电机的发电电压被控制在 12.8V-13.8V 之间。将此波形与图 5.3 电压调节控制发电机电压的波形和图 5.6 使用 Simulink 仿真得到的波形进行对比,发现单片机控制发电机的波形更贴近于电压调节器控制的发电机电压波形,因此得出结论单片机可以代替传统的电压调节器来实现控制发电机输出电压的功能。

5.2 蓄电池的相关参数测量

在上文完成了 STM32 单片机对发电机电压的监测与控制,可以通过单片机监测蓄电池的各项参数及蓄电池 SOC。对蓄电池的参数监测主要分为三个部分,对蓄电池的电压、

电流和温度的测量，由于这三个参数对蓄电池的 SOC 估算具有重要意义，因此本文将通过试验测得这些参数的数值，再将其数值与单片机测得数据进行对比，判断单片机检测蓄电池的准确性，同时可以根据测得的蓄电池的 SOC 与基于 EKF 法估算的蓄电池 SOC 进行对比，再通过 Matlab 进行拟合，得到其误差值。最终得出拖拉机可以满足正常三次启动时的压降与蓄电池剩余电量的数值。

5.2.1 试验方法

本文的最终目的是得到一个确切的 SOC 值，当蓄电池 SOC 在此值时，起动机还能维持三次正常的启动。因此本文试验就需要做蓄电池的放电试验，测试当蓄电池充满电时，对起动机进行启动试验，通过单片机监测得到的每次启动时，蓄电池的电压、电流、温度、电压降数值和蓄电池当前剩余电量的数值，并同时通过实际试验，使用智能蓄电池检测仪测得蓄电池的电压、电流和 SOC，电压表测得其电压降，使用红外温度仪测得蓄电池表面温度。将两者测得的数值进行对比，分析单片机监测的准确性。

本试验对三个蓄电池进行了启动测试，其中一个为骆驼牌 SOH=64% 的 95D31R 免维护型铅酸蓄电池，一个为风帆牌 SOH=100% 的 95D31R 免维护型铅酸蓄电池，这俩蓄电池都是 12V-80Ah-600A 的电池。还有一个为理士牌 SOH=100% 的 DJW12100S 免维护蓄电池，其为 12V100Ah 的电池。这三种蓄电池如下图 5.10、5.11、5.12 所示。



图 5.10 骆驼蓄电池
Fig. 5.10 Camel batteries



图 5.11 风帆蓄电池
Fig. 5.11 Windsurfing battery



图 5.12 理士蓄电池
Fig. 5.12 Reece batteries

本文采取的拖拉机为雷沃轮式拖拉机，其参数如下图 5.13 所示。对蓄电池的电压、电流以及温度的测量，采用如图 5.14 的智能蓄电池检测仪，其能够精确的测量出蓄电池的端电压、电流和剩余电量。通过红外温度仪对蓄电池的温度进行监测。



图 5.13 雷沃轮式拖拉机
Fig. 5.13 Reeva wheeled tractor



图 5.14 智能蓄电池检测仪
Fig. 5.14 Intelligent battery tester

对电压降的测量则是通过电压表测得的。在放电时，蓄电池的端电压可能会出现瞬间下降，然后缓慢回升，因此通过端电压来判断蓄电池的 SOC 状况不是很精确，而电压降则可以很好的体现蓄电池的 SOC 状况，当电压降降到一定数值时，此时蓄电池的 SOC 不足以保证发电机正常启动。

5.2.2 试验测得蓄电池参数

通过试验测蓄电池各项参数时，需要将发电机与蓄电池的连接断开，以此来保证蓄电池的电量仅供起动机启动，而不会被其他非必须用电件消耗电量。表 5-1 为对 SOH=64% 的骆驼牌蓄电池的参数测量，表 5-2 为对 SOH=100% 的风帆蓄电池的参数测量，表 5-3 为对 SOH=100% 的理士蓄电池各参数的测量。由于启动次数过多，数据量过大，因此仅采用蓄电池充满电开始启动实验后的十组数据、中间十组数据与蓄电池的剩余电量不足以使起动机正常启动的前二十组数据。由于铅酸蓄电池的工作温度在 -30℃-60℃，因此试验在室温为 16℃ 下进行。

表 5-1 试验测骆驼牌蓄电池参数

Tab. 5-1 Experimental Measurement of Camel Battery Parameters

起动次数	电压/V	电流/A	温度/℃	压降/V	SOC
1	12.71	221.4	19.1	9.88	0.648
2	12.67	221.1	19.3	9.87	0.642
3	12.65	220.8	19.9	9.82	0.637
4	12.63	220.6	20.1	9.79	0.631
5	12.60	220.2	20.5	9.77	0.627
6	12.59	219.7	21.0	9.78	0.622
7	12.62	219.3	21.8	9.75	0.616
8	12.57	219.1	22.4	9.70	0.610
9	12.53	218.9	22.9	9.67	0.606
10	12.51	218.6	23.6	9.63	0.594
.....
31	12.33	212.6	22.7	8.85	0.503
32	12.29	212.4	22.6	8.83	0.499
33	12.28	212.0	23.2	8.81	0.494
34	12.29	211.9	23.9	8.82	0.487
35	12.27	211.7	24.4	8.79	0.481
36	12.25	211.2	25.0	8.75	0.477
37	12.24	210.8	25.7	8.72	0.472

38	12.22	210.5	26.2	8.72	0.468
39	12.22	210.4	26.9	8.69	0.463
40	12.20	210.1	27.3	8.68	0.460
.....
58	12.12	206.5	25.7	8.01	0.382
59	12.12	205.8	25.9	7.91	0.380
60	12.11	205.4	26.3	7.88	0.377
61	12.09	204.9	27.3	7.76	0.374
62	12.08	204.3	28.1	7.79	0.369
63	12.06	204.1	28.7	7.72	0.362
64	12.09	203.6	29.4	7.68	0.357
65	12.07	203.1	29.8	7.63	0.351
66	12.07	202.5	30.3	7.64	0.345
67	12.06	201.9	31.0	7.57	0.339
68	12.04	201.4	31.5	7.53	0.333
69	12.03	200.9	32.0	7.49	0.327
70	12.05	200.2	32.8	7.43	0.320
71	12.02	199.7	33.4	7.38	0.313
72	12.02	199.3	33.9	7.34	0.306
73	12.02	198.8	34.2	7.22	0.303
74	12.00	198.5	34.8	7.21	0.297
75	11.99	198.1	35.5	7.19	0.291
76	11.96	197.9	36.9	7.07	0.285
77	11.93	197.5	37.3	6.93	0.283

从表 5-1 的试验数值可以得出将 SOH=64%的骆驼牌蓄电池充满电，其可以维持起动机起动 77 次，当电压降为 7.21V，SOC=29.7%时，蓄电池的剩余电量还可以勉强维持起动机的三次起动。

表 5-2 试验测风帆牌蓄电池参数

Tab. 5-2 Battery Parameters of Experimental Wind Fan

起动次数	电压/V	电流/A	温度/℃	压降/V	SOC
1	12.71	222.7	19.1	9.97	1
2	12.71	222.6	19.1	9.96	1
3	12.69	222.4	19.5	9.96	0.998
4	12.69	222.2	19.6	9.92	0.995

5	12.69	222.4	19.9	9.89	0.993
6	12.67	222.3	20.3	9.87	0.993
7	12.66	222.1	20.8	9.85	0.990
8	12.66	221.9	21.2	9.84	0.989
9	12.65	221.6	21.1	9.84	0.983
10	12.65	221.6	21.7	9.82	0.980
.....
56	12.35	212.8	24.6	8.71	0.706
57	12.34	212.7	24.9	8.69	0.699
58	12.36	212.5	25.3	8.66	0.693
59	12.34	212.5	25.6	8.63	0.688
60	12.34	212.3	25.9	8.63	0.683
61	12.33	212.4	26.3	8.61	0.678
62	12.31	212.1	26.3	8.57	0.671
63	12.31	211.8	26.9	8.58	0.667
64	12.29	211.7	27.2	8.54	0.660
65	12.28	211.4	27.7	8.53	0.656
.....
112	11.95	200.6	30.4	7.33	0.379
113	11.95	200.5	30.7	7.32	0.376
114	11.94	200.3	30.7	7.33	0.370
115	11.92	200.3	31.0	7.30	0.366
116	11.92	199.9	31.1	7.27	0.358
117	11.91	199.6	31.5	7.25	0.352
118	11.89	199.5	31.4	7.22	0.347
119	11.89	199.3	31.9	7.19	0.340
120	11.88	199.3	32.3	7.20	0.337
121	11.85	199.1	32.3	7.17	0.329
122	11.85	198.7	32.7	7.14	0.322
123	11.83	198.7	33.1	7.12	0.318
124	11.82	198.5	33.6	7.09	0.313
125	11.83	198.1	33.6	7.07	0.309
126	11.81	198.3	34.2	7.04	0.304
127	11.81	197.9	34.6	7.01	0.301

128	11.80	197.5	34.9	6.98	0.294
129	11.78	197.3	35.3	6.95	0.289
130	11.78	197.3	35.3	6.92	0.281
131	11.76	197.1	36.4	6.88	0.273

从 5-2 表的试验数值可以得出将 SOH=100% 的风帆牌蓄电池充满电进行起动试验, 其起动到 132 次时拖拉机无法起动。因此当起动机起动 128 次, 此时电压降为 6.98V, SOC=29.4%, 蓄电池的剩余电量还可以勉强维持起动机的三次起动。

表 5-3 试验测理士蓄电池参数

Tab. 5-3 Battery Parameters for Experimental Meters

起动次数	电压/V	电流/A	温度/℃	压降/V	SOC
1	12.77	223.1	19.2	9.99	1
2	12.77	222.6	19.2	9.98	1
3	12.76	222.6	19.5	9.98	1
4	12.75	222.5	19.8	9.97	0.998
5	12.74	222.3	20.2	9.96	0.996
6	12.72	222.0	20.6	9.96	0.996
7	12.72	221.6	21.0	9.95	0.995
8	12.70	221.5	21.4	9.93	0.993
9	12.69	221.2	21.7	9.91	0.992
10	12.68	221.2	22.1	9.90	0.991
.....
73	12.44	207.9	27.1	8.78	0.695
74	12.43	207.8	27.5	8.75	0.686
75	12.43	207.5	27.5	8.73	0.680
76	12.40	207.5	27.8	8.73	0.677
77	12.41	207.2	28.0	8.69	0.671
78	12.39	207.1	28.1	8.67	0.666
79	12.38	206.7	28.7	8.64	0.663
80	12.37	206.6	28.7	8.60	0.655
81	12.36	206.4	29.4	8.54	0.649
82	12.36	206.3	29.5	8.50	0.643
.....
144	11.88	193.1	32.7	7.10	0.333
145	11.88	193.5	33.2	7.09	0.332

146	11.87	193.5	33.8	7.09	0.330
147	11.86	193.7	33.8	7.06	0.327
148	11.85	193.9	34.1	7.04	0.326
149	11.83	194.3	34.5	7.01	0.322
150	11.84	194.3	34.8	7.00	0.319
151	11.81	194.7	35.0	6.97	0.315
152	11.79	195.0	35.6	6.95	0.311
153	11.79	195.1	35.7	6.92	0.307
154	11.77	195.4	35.9	6.90	0.304
155	11.73	195.5	35.9	6.90	0.300
156	11.75	195.8	36.5	6.86	0.297
157	11.73	196.1	37.0	6.84	0.293
158	11.72	196.1	37.2	6.81	0.289
159	11.71	196.3	37.5	6.78	0.285
160	11.71	196.4	37.8	6.77	0.281
161	11.69	196.6	38.2	6.75	0.278
162	11.68	196.6	38.5	6.73	0.274
163	11.65	196.8	38.6	6.71	0.270

从表 5-3 的试验数值可以得出将 SOH=100%的理士牌蓄电池充满电进行起动试验,其起动到 164 次时拖拉机无法起动,当电压降为 6.77V, SOC=28.1%时,蓄电池的剩余电量还可以勉强维持起动机的三次起动。

5.2.3 单片机监测的蓄电池参数

本小节使用单片机来测得三个蓄电池的各项参数。通过单片机监测蓄电池各项参数时,在单片机上加入了一个继电器,通过继电器可以断开蓄电池与其他用电件的连接,使得蓄电池的电量仅供发电机起动,从而确保测得蓄电池的 SOC 的准确性。如表 5-4、5-5、5-6 所示为单片机对三个蓄电池的参数监测。

表 5-4 单片机监测的骆驼蓄电池参数

Tab. 5-4 Parameters of Camel Battery Monitored by Single Chip Microcomputer

起动次数	电压/V	电流/A	温度/℃	压降/V	SOC
1	12.71	221.8	19.1	9.88	0.648
2	12.69	221.6	19.1	9.87	0.645
3	12.64	220.5	19.6	9.83	0.640
4	12.60	220.3	20.0	9.78	0.635

5	12.57	220.0	20.5	9.77	0.628
6	12.55	219.5	21.1	9.76	0.624
7	12.53	219.1	21.7	9.73	0.619
8	12.52	219.0	22.3	9.71	0.611
9	12.49	218.7	22.9	9.69	0.606
10	12.46	218.4	23.5	9.65	0.597
.....
31	12.35	212.9	22.9	8.87	0.506
32	12.30	212.7	22.5	8.82	0.499
33	12.28	212.5	23.3	8.80	0.493
34	12.27	212.0	24.0	8.78	0.485
35	12.27	211.7	24.6	8.76	0.480
36	12.26	211.4	25.1	8.75	0.476
37	12.24	210.9	25.7	8.74	0.471
38	12.24	210.6	26.2	8.72	0.464
39	12.23	210.3	26.9	8.69	0.460
40	12.21	210.1	27.3	8.67	0.453
.....
58	12.14	206..7	25.4	8.03	0.380
59	12.12	205.9	25.9	7.95	0.376
60	12.10	205.7	26.3	7.88	0.373
61	12.10	205.0	27.1	7.81	0.370
62	12.09	204.8	27.9	7.76	0.367
63	12.07	204.3	28.6	7.72	0.362
64	12.07	203.6	29.3	7.68	0.357
65	12.06	203.1	29.8	7.65	0.351
66	12.05	202.7	30.4	7.62	0.345
67	12.06	201.9	31.0	7.57	0.339
68	12.04	201.6	31.6	7.52	0.333
69	12.05	201.0	32.2	7.49	0.327
70	12.03	200.4	32.8	7.42	0.320
71	12.0	199.9	33.4	7.37	0.313
72	12.01	199.6	33.9	7.31	0.306
73	12.00	198.9	34.4	7.24	0.302

74	11.99	198.7	34.9	7.18	0.297
75	11.99	198.3	35.5	7.10	0.291
76	11.97	197.9	36.8	7.01	0.287
77	11.94	197.7	37.3	6.93	0.284

根据单片机测得 SOH=64%的骆驼蓄电池参数与估算的蓄电池 SOC 可得,当蓄电池的电压降为 7.18V, SOC=29.7%时,拖拉机还能维持正常的三次起动,且 EKF 法估算的蓄电池 SOC 与实际试验测得的 SOC 误差值很小。

表 5-5 单片机监测的风帆蓄电池参数

Tab. 5-5 Parameters of Sail Battery Monitored by Single Chip Microcomputer

起动次数	电压/V	电流/A	温度/℃	压降/V	SOC
1	12.71	222.7	19.2	9.97	1
2	12.70	222.6	19.3	9.96	0.998
3	12.69	222.5	19.6	9.96	0.996
4	12.69	222.4	19.8	9.95	0.996
5	12.68	222.3	19.9	9.94	0.992
6	12.67	222.1	20.4	9.90	0.991
7	12.66	221.9	20.8	9.89	0.990
8	12.65	221.9	21.3	9.87	0.986
9	12.65	221.7	21.5	9.85	0.983
10	12.63	221.6	21.9	9.82	0.980
.....
56	12.38	213.0	24.9	8.74	0.704
57	12.37	212.7	25.3	8.70	0.699
58	12.36	212.6	25.8	8.67	0.695
59	12.36	212.5	26.0	8.62	0.689
60	12.34	212.5	26.3	8.62	0.683
61	12.33	212.3	26.5	8.59	0.678
62	12.32	212.1	26.5	8.559	0.672
63	12.30	211.8	26.9	8.56	0.667
64	12.28	211.4	27.3	8.54	0.661
65	12.26	211.4	27.7	8.51	0.656
.....
112	11.97	200.9	30.6	7.36	0.379
113	11.95	200.5	30.9	7.33	0.374

114	11.94	200.1	31.0	7.30	0.370
115	11.92	200.0	31.3	7.30	0.364
116	11.91	199.7	31.6	7.27	0.358
117	11.90	199.6	31.8	7.24	0.351
118	11.89	199.4	31.8	7.21	0.345
119	11.87	199.3	32.1	7.17	0.340
120	11.87	199.3	32.5	7.17	0.334
121	11.85	199.1	32.7	7.15	0.329
122	11.85	198.8	33.0	7.14	0.322
123	11.84	198.7	33.3	7.12	0.317
124	11.83	198.5	33.6	7.09	0.313
125	11.83	198.1	33.9	7.06	0.308
126	11.82	198.5	34.3	7.04	0.304
127	11.81	197.9	34.7	7.00	0.297
128	11.79	197.5	35.0	6.98	0.290
129	11.79	197.3	35.5	6.94	0.288
130	11.78	197.2	35.9	6.91	0.284
131	11.76	197.1	36.4	6.88	0.277

根据单片机测得 SOH=100%的风帆牌蓄电池参数与估算的蓄电池 SOC 可以看出当蓄电池的电压降为 6.98V, SOC=29.0%时, 拖拉机还能维持正常的三次起动, 且根据风帆蓄电池与骆驼蓄电池的试验数值可以得出, 完全一样的两个蓄电池, 蓄电池的 SOH 越高, 其内阻越小, 使用状态越好, 使用寿命越长。

表 5-6 单片机监测理士蓄电池参数

Tab. 5-6 Single chip microcomputer monitoring Ricci battery parameters

起动次数	电压/V	电流/A	温度/℃	压降/V	SOC
1	12.79	223.5	19.2	10.02	1
2	12.77	222.9	19.4	10.00	1
3	12.75	222.6	19.6	9.99	0.998
4	12.75	222.4	19.8	9.98	0.997
5	12.73	222.0	20.1	9.97	0.996
6	12.72	229.8	20.5	9.96	0.996
7	12.71	221.6	21.0	9.96	0.994
8	12.70	221.3	21.5	9.94	0.992
9	12.69	221.2	21.9	9.93	0.992

10	12.68	221.2	22.1	9.91	0.989
.....
73	12.44	208.0	27.3	8.79	0.691
74	12.43	207.8	27.4	8.75	0.686
75	12.42	207.5	27.6	8.73	0.680
76	12.41	207.5	27.8	8.72	0.675
77	12.41	207.3	28.1	8.69	0.670
78	12.38	207.0	28.5	8.67	0.666
79	12.37	206.7	28.7	8.64	0.661
80	12.35	206.6	28.7	8.60	0.655
81	12.33	206.4	29.2	8.56	0.649
82	12.33	206.1	29.5	8.51	0.642
.....
144	11.86	193.5	33.0	7.10	0.333
145	11.86	193.6	33.4	7.09	0.331
146	11.85	193.9	33.8	7.08	0.330
147	11.84	194.1	33.9	7.06	0.328
148	11.83	194.2	34.2	7.03	0.325
149	11.83	194.3	34.5	7.00	0.321
150	11.82	194.6	34.8	6.99	0.319
151	11.80	194.7	35.0	6.96	0.315
152	11.78	195.0	35.4	6.95	0.310
153	11.78	195.2	35.7	6.93	0.307
154	11.77	195.4	35.9	6.91	0.304
155	11.73	195.6	36.0	6.90	0.300
156	11.75	195.8	36.5	6.87	0.294
157	11.73	196.1	37.0	6.85	0.291
158	11.72	196.1	37.3	6.81	0.288
159	11.71	196.3	37.5	6.78	0.285
160	11.71	196.5	37.9	6.75	0.280
161	11.69	196.6	38.2	6.72	0.274
162	11.68	196.6	38.9	6.70	0.270
163	11.65	196.7	38.8	6.68	0.263

根据单片机测得 SOH=100%的理士蓄电池三项参数与估算的蓄电池 SOC 可以看出当

蓄电池的电压降为 6.75V, SOC=28.0%时, 拖拉机还能维持正常的三次起动。

综上所述, 得出当电压降为 7.21V, SOC=29.7%时, 蓄电池的剩余电量还可以勉强维持起动机的三次起动, 由此在日常使用拖拉机过程中, 当蓄电池的 SOC 在 30%左右, 需要对拖拉机蓄电池进行及时充电, 从而防止拖拉机宕机。

5.2.4 蓄电池 SOC 的数据分析

根据以上数据可得, 单片机监测的蓄电池的电压、电压和温度的数值与实际试验测得的数值误差不大, 由于本文的最终目的是得到一个准确的 SOC 数值, 蓄电池的剩余电量在此值时, 拖拉机还能维持三次正常的起动, 因此上表的三个蓄电池的 SOC 试验数值与实际试验数值进行拟合, 从而验证算法估算的精确度。

图 5.15 为对骆驼牌蓄电池的 SOC 拟合, 图 5.16 为单片机测得数值与实际试验数值之间的误差。

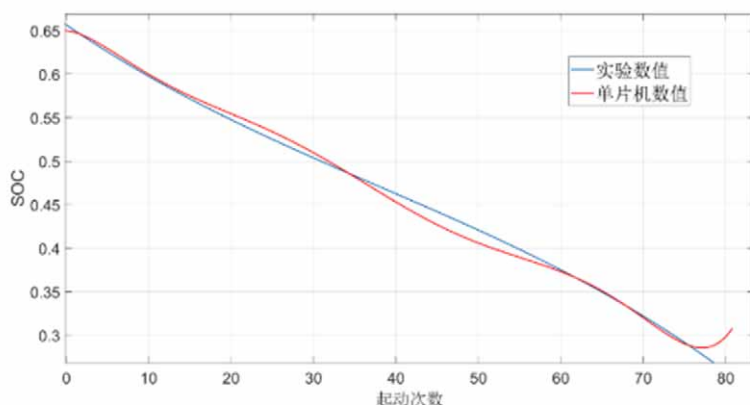


图 5.15 骆驼牌蓄电池 SOC 拟合

Fig. 5.15 Camelot battery SOC fit

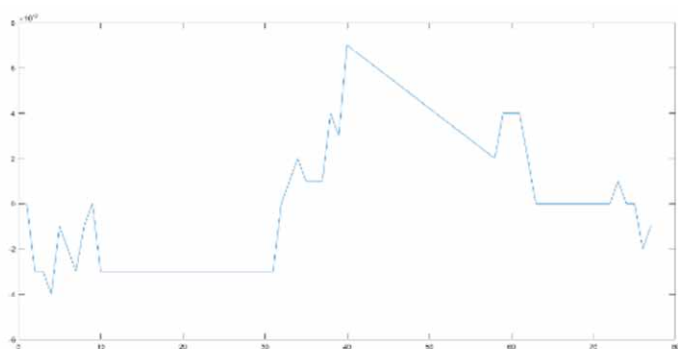


图 5.16 骆驼牌蓄电池 SOC 误差

Fig. 5.16 SOC Error of Camel Battery

根据图 5.16, 通过方差法得出 EKF 法估算的骆驼蓄电池 SOC 与实际试验测得的骆驼

蓄电池 SOC 误差值为 0.8%，

图 5.17 为对风帆蓄电池的 SOC 拟合，图 5.18 为单片机测得数值与实际试验数值之间的误差。

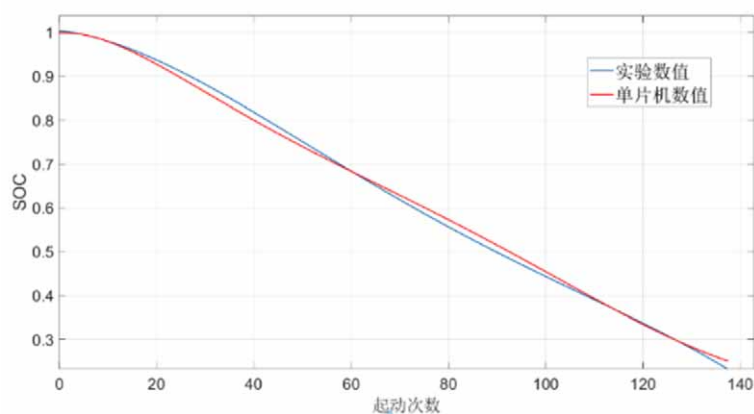


图 5.17 风帆蓄电池 SOC 拟合

Fig. 5.17 Wind sail battery SOC fitting

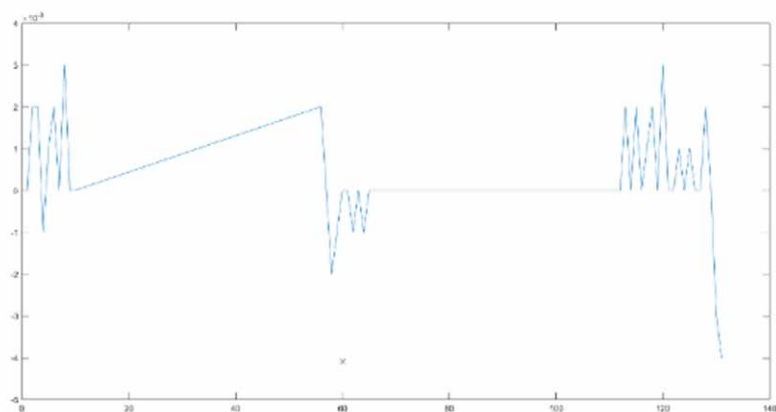


图 5.18 风帆蓄电池 SOC 误差

Fig. 5.18 sail battery SOC error

根据图 5.18 通过方差得出 EKF 法估算的风帆蓄电池 SOC 与实际试验测得的风帆蓄电池 SOC 误差值为 0.3%。

图 5.19 为对理士蓄电池的 SOC 拟合，图 5.20 为单片机测得数值与实际试验数值之间

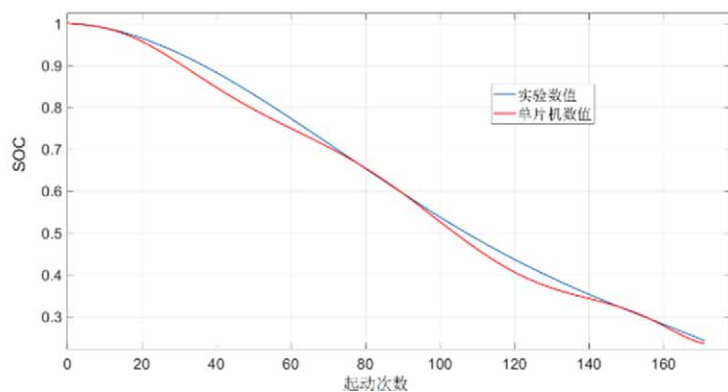


图 5.19 理士蓄电池 SOC 拟合

Fig. 5.19 Lizi battery SOC fitting

的误差。

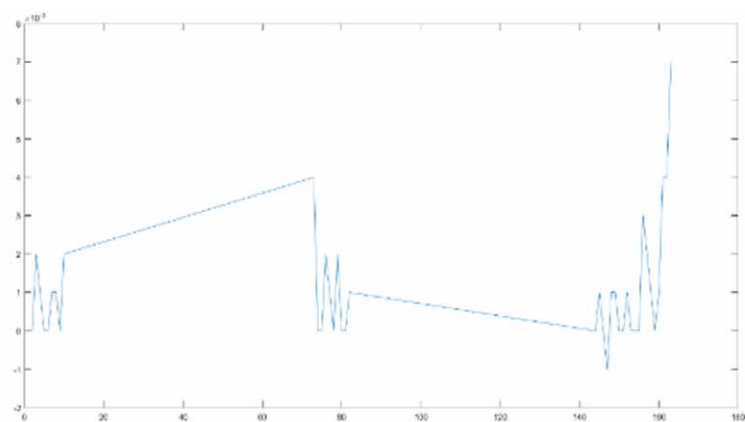


图 5.20 理士蓄电池 SOC 误差

Fig. 5.20 Lizi Battery SOC Error

根据图 5.20，通过方差得出 EKF 法估算的理士蓄电池 SOC 与实际试验测得的理士蓄电池 SOC 误差值为 0.7%。

综上所述，基于复合模型的扩展卡尔曼滤波法估算的蓄电池 SOC 与实际试验测得的蓄电池 SOC 的误差值在 1%。由此可以得出基于复合模型的扩展卡尔曼滤波法估算的蓄电池 SOC 数值准确。

5.3 本章小结

本章在完成了实物设计的前提下，使用 STM32F103C8T6 单片机通过汽车电器万能试验台验证其控制发电机电压。再通过对拖拉机进行起动实验，将实际使用智能蓄电池检测仪与单片机监测的蓄电池的电压、电流、温度与 SOC 进行对比，得到两者的 SOC 误差值在 1%左右。再根据试验数值，得到蓄电池的 SOC 在 30%左右时，蓄电池的剩余电量能满足拖拉机三次的正常启动。

第六章 结论与展望

6.1 结论

本文对拖拉机的电源管理系统做了深入的研究。通过使用 STM32 单片机代替电压调节器来控制发电机的电压,同时监测蓄电池的电压、电流与温度参数。本文对蓄电池的监测原理是将蓄电池的 SOC 作为指标,来监测蓄电池的各项参数,并且根据此基础设计了监控蓄电池的硬件电路与软件流程,以传统电压调节器控制的电压范围 12.8-13.8V 为标准对发电机电压进行控制,设计控制发电机的电压也在此范围内的硬件电路。

最后通过试验来对设计的单片机监测的拖拉机电源管理系统进行验证,并最终得出:拖拉机在蓄电池剩余电量为 30%时,还能维持三次正常的起动。本文完成的主要内容:

(1) 使用单片机代替电源管理系统中的电压调节器,控制发电机电压在 12.8V-13.8V 之间。

(2) 对蓄电池 SOC 进行估算。本文使用的是扩展卡尔曼滤波法,并建立了基于复合模型的电池模型,对模型进行了电流系数与温度系数的修正,使其估算的数值更加准确。

(3) 使用 STM32F103C8T6 设计出单片机控制发电机电压与监测蓄电池电压、电流与温度参数的硬件电路,通过对采集到的蓄电池参数进行处理从而估算出蓄电池的 SOC,在完成硬件电路设计的前提下,接着完成了软件流程图的设计。

(4) 将设计完成的 STM32F103C8T6 单片机通过汽车万能试验台测出蓄电池的电压、电流与温度,并估算蓄电池的 SOC,再使用智能蓄电池监测蓄电池的参数,将二者数据进行拟合,最后得出其误差值。最终得出结论当蓄电池的 SOC 在 30%时,此时拖拉机刚好能维持三次正常启动。

6.2 创新点

本文的创新在于使用 STM32F103C8T6 单片机来代替传统的拖拉机电源管理系统中的电压调节器来控制发电机的输出电压,同时还可以监测蓄电池的电压、电流与温度参数。在此基础上,通过扩展卡尔曼滤波法能准确的估算出蓄电池的 SOC。

6.3 展望

本文完成了单片机代替电压调节器实现控制发电机电压的功能,同时还能监测蓄电池的电压、电流和温度,并在此基础上对蓄电池的 SOC 进行估算,但是时间有限和能力有

限，文中还存在一些问题需要进行下一步的研究与改进：

（1）影响蓄电池 SOC 的参数并不仅仅只有其电压、电流与温度，还有内阻等影响，因此本文的蓄电池复合模型并不完善，还需进一步引入蓄电池 SOC 的其他影响参数，对蓄电池的模型进行进一步的优化，从而使估算出来的 SOC 值更加准确。

（2）由于频繁起动拖拉机会损坏起动机，因此在试验过程中，起动机每次起动不可以超过 5s，停止 2min 再进行再次起动，目的为了让蓄电池进行恢复。对拖拉机连续起动三次后需要停歇 15 分钟，待起动机完全冷却后再起动。因此蓄电池模型引入的温度系数会不准确，导致蓄电池 SOC 估算数值也不够精准。

参考文献

- [1] 贺莹. 汽车用蓄电池管理系统 [D]; 贵州大学, 2009.
- [2] 周炎, 施伟锋, 张威. 基于 RBF 神经网络的永磁同步电机矢量控制系统[J]. 船电技术, 2016, 36 (8) :4.
- [3] 唐旺祥, 沈国平, 何衍. 面向通信基站的蓄电池组在线监测系统设计[J]. 传感器与微系统, 2013, 32 (5) :4.
- [4] 严加朋. 蓄电池电量计量与管理系统的研究 [D]; 东北大学, 2011.
- [5] PILATOWICZ G,MARONGIU A,DRILLKENS J,et al. A critical overview of definitions and determination techniques of the internal resistance using lithium-ion,lead-acid,nickel metal-hydrde batteries and electrochemical double-layer capacitors as examples [J]. 2015,296: 365-76.
- [6] 李焱. 面向 UPS 的铅酸蓄电池组在线检测系统设计 [D]; 东华大学,2015.
- [7] 崔伯雄,隋欣,赵景焕. 电池管理系统重点专利技术分布——适用于纯电动汽车 [J]. 2010, (6) : 5.
- [8] 张永杰. 纯电动汽车动力型锂电池管理系统的研究与设计 [D]; 浙江工业大学.
- [9] SUNG W, HWANG D S, JEONG B J, et al. Electrochemical battery model and its parameter estimator for use in a battery management system of plug-in hybrid electric vehicles [J]. 2016, 17 (3) :493-508.
- [10] HANNAN M A,LIPU M,HUSSAIN A,et al. A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations [J]. 2017,78 (oct.) : 834-54.
- [11] PILATOWICZ G,BUDDE-MEIWES H,KOWAL J,et al. Determination of the lead-acid battery's dynamic response using Butler-Volmer equation for advanced battery management systems in automotive applications [J]. 2016,331 (nov.1) : 348-59.
- [12] 厉蕊. 我国电动汽车电池管理系统联合开发管理研究 [D]; 北京交通大学,2017.
- [13] DURR M,CRUDEN A,GAIR S J J O P S. Dynamic model of a lead acid battery for use in a domestic fuel cell system [J]. 2006,161 (2) : 1400-11.
- [14] 张书郎. 车用大功率节能型电压调节器:, CN201332294Y[P]. 2009.
- [15] 黄瑞,赵春莲,明鑫. 电池管理系统测试平台设计与实现 [J]. 2017,32 (1) : 6.
- [16] 肖艳军,刘蕊,宋海平. 基于单片机的锂电池管理系统研究与试验 [J]. 2016,23 (7) : 5.
- [17] 贺炜. 一款新颖的带隙基准电压源设计[J]. 电子科技, 2010 (9) :8.
- [18] 王锐. 高性能单片集成汽车电压调节器研究与设计 [D]; 贵州大学,2019.
- [19] COSTA E V,ASSIS M F D,B. P M L et al. Chemical constituents isolated from the bark of Guatteria blepharophylla (Annonaceae) and their antiproliferative and antimicrobial activities [J].2011,22 (6) :

- 34-51.
- [20] BATES A,MUKERJEE S,SANG C L,et al. An analytical study of a lead-acid flow battery as an energy storage system [J]. 2014,249 (mar.1) : 207-18.
- [21] Pavlov D . Lead-Acid Batteries: Science and Technology[J]. Elsevier Science Ltd, 2017.
- [22] COOPER A J J O P S. Development of a lead-acid battery for a hybrid electric vehicle [J]. 2004,133 (1) : 116-25.
- [23] 李匡成, 刘政, 刘岩. 铅酸蓄电池等效电路模型参数辨识及仿真验证[J]. 四川兵工学报, 2015, 36 (7) :3.
- [24] XING Y,WEI H,PECHT M,et al. State of charge estimation of lithium-ion batteries using the open-circuit voltage at various ambient temperatures [J]. 2014,113 (1) : 106-15.
- [25] 陈红雨, 吴玲, 任超. 从欧洲蓄电池会议看国外铅酸蓄电池的研究动态[J]. 蓄电池, 2000 (4) :3.
- [26] TAGUCHI M,SUGITA H J J O P S. Analysis for electrolytic oxidation and reduction of PbSO₄/Pb electrode by electrochemical QCM technique [J]. 2002,109 (2) : 294-300.
- [27] LIU X,WU J,ZHANG C,et al. A method for state of energy estimation of lithium-ion batteries at dynamic currents and temperatures [J]. 2014,270: 151-7.
- [28] SHEN W X,CHAN C C,LO E,et al. Estimation of battery available capacity under variable discharge currents [J]. 2002,103 (2) :180-7.
- [29] TALHA M,ASGHAR F,KIM S H J A J F S,et al. A Neural Network-Based Robust Online SOC and SOH Estimation for Sealed Lead-Acid Batteries in Renewable Systems [J].2018.
- [30] PILLER S,PERRIN M,JOSSEN A J J O P S. Methods for state-of-charge determination and their applications [J]. 2001.
- [31] 白连庆. 蓄电池硫化原因分析及处理[J]. 设备管理与维修, 2005 (6) :40-40.
- [32] BLANKE H,BOHLEN O,BULLET S J J O P S. Impedance measurements on lead-acid batteries for state-of-charge,state-of-health and cranking capability prognosis in electric and hybrid electric vehicles [J]. 2005,144 (2) :418-25.
- [33] TSENG I K,INAMORI M,MORIMOTO M. SOH estimation of lead acid battery by the variation of equivalent circuit parameters by the deterioration; proceedings of the International Conference on Electrical Machines & Systems,F,2013 [C].
- [34] KONG S N,MOO C S,CHEN Y P,et al. Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries [J].2009,86 (9) :1506-11.
- [35] 林成涛,陈全世,王军平. 用改进的安时计量法估计电动汽车动力电池 SOC [J]. 2006,46 (2) : 5.
- [36] QIANG Z,SHAO C,HA Y. State of Charge Estimation for Electric Vehicle Battery Based on Amended Ah Metrology; proceedings of the International Conference on Communication and Electronic Information Engineering (CEIE 2016) ,F,2017 [C].

- [37] CHIASSON J, VAIRAMOHAN B J I T O C S T. Estimating the state of charge of a battery [J]. 2005, 13 (3) : 465-70.
- [38] VALDEZ M, VALERA J, ARTEAGA M. Estimating Soc in Lead-Acid Batteries Using Neural Networks in a Microcontroller-Based Charge-Controller; proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks, F, 2006 [C].
- [39] HUNG M H, LIN C H, LEE L C, et al. State-of-charge and state-of-health estimation for lithium-ion batteries based on dynamic impedance technique [J]. 2014, 268 (dec.5) : 861-73.
- [40] 雷肖, 陈清泉, 刘开培. 电动车电池 SOC 估计的径向基函数神经网络方法 [J]. 2008, 23 (5) : 7.
- [41] MORITA Y, YAMAMOTO S, SUN H L, et al. On-Line Detection of State-of-Charge in Lead Acid Battery Using Both Neural Network and On-Line Identification; proceedings of the IEEE, F, 2006 [C].
- [42] A C B, A Z Y, A Z J, et al. Ni-MH batteries state-of-charge prediction based on immune evolutionary network - ScienceDirect [J]. 2009, 50 (12) : 3078-86.
- [43] A P S, A R V, B X W, et al. Design and implementation of a fuzzy logic-based state-of-charge meter for Li-ion batteries used in portable defibrillators [J]. 2006, 162 (2) : 829-36.
- [44] MALKHANDI S J E A O A I. Fuzzy logic-based learning system and estimation of state-of-charge of lead-acid battery [J]. 2006, 19 (5) : 479-85.
- [45] SU C, KANG C, ZHANG Z, et al. A method for SOC estimation for lead-acid battery based on multi-model adaptive Extended Kalman Filtering estimation; proceedings of the Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, F, 2016 [C].
- [46] PIAO C, SUN Z, LIANG Z, et al. SOC Estimation of Lead-Acid Batteries Based on UKF; proceedings of the 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering, [F].
- [47] SANTOS R, ALVES C, MACEDO E, et al. Lead acid battery SoC estimation based on extended Kalman Filter method considering different temperature conditions; proceedings of the Instrumentation & Measurement Technology Conference, F, 2017 [C].
- [48] 徐杰. 基于卡尔曼滤波的动力电池组 SOC 精确估计 [D]; 杭州电子科技大学.
- [49] 邓自立. 卡尔曼滤波与维纳滤波: 现代时间序列分析方法 [M]. 哈尔滨工业大学出版社, 2003.
- [50] HE H, XIONG R, GUO H, et al. Comparison study on the battery models used for the energy management of batteries in electric vehicles [J]. 2012, 64: 113-21.
- [51] 朱敏. 基于电动车电池组 SOC 估计方法的研究 [D]; 河南师范大学, 2014.
- [52] 何灵娜. 基于卡尔曼滤波的动力电池 SOC 估计算法设计 [D]; 浙江工业大学, 2014.
- [53] 全猛, 卢兰光, 欧阳明高. Peukert 方程的适用性分析及基于二阶段放电法的 Peukert 模型修正 [J]. 2010, 46 (10) : 121-5.
- [54] 全猛, 邵静玥, 卢兰光. 基于二阶段放电试验的磷酸铁锂电池的 Peukert 模型 [J]. 2010, (02) : 295-8.