

目 录

1 绪论	1
1.1 本课题研究的背景和意义	1
1.2 国内外研究现状	5
1.3 雷电监控存在的问题和差距	7
1.4 雷电	8
1.5 雷灾特点	9
1.6 雷击的危害	10
1.6.1 直击雷的危害	11
1.6.2 感应雷的危害	11
1.7 雷电监控系统的方案措施	12
2 雷电特性	15
2.1 雷电流参数	15
2.1.1 双指数函数形式	15
2.1.2 Heidler 函数 (IEC 推荐雷电流解析表达式)	16
2.1.3 脉冲函数形式	17
2.2 系统方案的选择	17
2.2.1 TMS320C2000 系列数字信号处理器平台	18
2.2.2 TMS320F2812	18
3 雷电监控系统硬件设计	22
3.1 雷电监控系统总体方案	22
3.2 雷电流检测模块	23
3.3 TMS320F2812 模数转换模块	27
3.4 DSP 外围电路设计	28
3.4.1 电源电路设计	28
3.4.2 时钟电路	29
3.4.2 复位电路	31
3.4.2 JTAG 电路设计	32
3.5 串行通信	33
3.5.1 异步通信	33
3.5.2 串行通信接口电路	34
3.5.3 RS-232C	35
3.6 系统的防雷措施	37
3.6.1 防雷保护区	37

3.6.2 接闪器.....	38
3.6.3 避雷器.....	41
3.7 接地.....	42
3.7.1 接地电阻.....	43
3.7.2 接地极.....	44
4 雷电监控系统软件设计.....	46
4.1 集成开发环境 CCS	46
4.2 系统总体软件设计	48
4.3 串口通信模块.....	49
4.4 数据采集 ADC 模块.....	51
4.5 数据处理模块.....	52
4.6 显示模块.....	53
5 总结与展望.....	54
5.1 总结.....	54
5.2 展望.....	54
致 谢.....	56
参考文献.....	57
附录.....	60

1 绪论

1.1 本课题研究的背景和意义

能源是提高国民经济发展和人民生活水平的重要物质基础。随着经济的发展、社会的进步，人们对能源利用的要求越来越高。目前以石油，煤为代表的化石燃料仍然是能源的主要来源。一方面，化石燃料的使用带来了严重的环境污染，大量的 CO₂, SO₂, NO_x 气体以及其他污染物，导致了温室效应的产生和酸雨的形成。另一方面，由于化石燃料的不可再生性和有限的储量，日益增长的能源需求带来了严重的能源危机。据估计，按照目前的消耗量，石油仅仅能维持不到 50 年，而煤也只能维持 200 年。而作为能源需求大国的中国，目前已经有超过 50% 的石油需要进口，而到 2010 年，这一数字可能会增长到 55%。因此发展清洁的，可再生的新能源的要求越来越迫切。目前，我国环境污染问题突出，生态系统脆弱，大量开采和使用化石能源对环境影响很大，特别是我国能源消费结构中煤炭比例偏高，二氧化碳排放增长较快，对气候变化影响较大。可再生能源清洁环保，开发利用过程不增加温室气体排放。开发利用可再生能源，对优化能源结构、保护环境、减排温室气体、应对气候变化具有十分重要的作用。2005 年 2 月 16 日正式生效的《京都议定书》，将深刻改变世界能源发展模式及各国能源发展战略。而在能源危机日趋严峻的背景下，寻找安全清洁的新能源成为当前人类面临的迫切课题。

作为人类生存和发展的重要物质基础，煤炭、石油、天然气等化石能源支撑了 19 世纪到 20 世纪近 200 年来人类文明的进步和经济社会发展。然而，化石能源的不可再生性和人类对其的巨大消耗，使化石能源正在逐渐走向枯竭。化石能源是目前全球消耗的最主要能源，2006 年全球消耗的能源中化石能源占比高达 87.9%，我国的比例高达 93.8%。但随着人类的不断开采，化石能源的枯竭是不可避免的，大部分化石能源本世纪将被开采殆尽。从另一方面看，由于化石能源的使用过程中会新增大量温室气体 CO₂，同时产生一些有污染的烟气，威胁全球生态。因而，开发更清洁的可再生能源是今后发展的方向。太阳能资源丰富，既可免费使用，又无需运输，对环境无任何污染。为人类创造了一种新的生活形态，使社会及人类进入一个节约能源减少污染的时代。太阳能以其独特的优势成为发展新能源的首选，太阳能发电尤为让人青睐。

1995 年国家计委、国家科委和国家经贸委制定了《新能源和可再生能源发展纲要》在（1996~2010 年）制出，明确提出中国在 1996-2010 年新能源和可再生能源的发展目标、任务以及相应的对策和措施。这些文件的制定和实施，对进一步推动中国太阳能事业发挥了重要作用。1996 年，联合国在津巴布韦召开“世

界太阳能高峰会议”，会后发表了《哈拉雷太阳能与持续发展宣言》，会上讨论了《世界太阳能 10 年行动计划》(1996 ~ 2005 年),《国际太阳能公约》,《世界太阳能战略规划》等重要文件。这次会议进一步表明了联合国和世界各国对开发太阳能的坚定决心,要求全球共同行动,广泛利用太阳能。开发利用可再生能源是开拓新的经济增长领域、促进经济转型、扩大就业的重要选择。可再生能源资源分布广泛,各地区都具有一定的可再生能源开发利用条件。可再生能源的开发利用主要是利用当地自然资源和人力资源,对促进地区经济发展具有重要意义。同时,可再生能源也是高新技术和新兴产业,快速发展的可再生能源已经成为一个新的经济增长点,可以有效拉动装备制造等相关产业的发展,对调整产业结构,促进经济增长方式转变,扩大就业,推进经济和社会的可持续发展意义重大。

中国是世界上最大的煤炭生产国和消费国,煤炭约占商品能源消费结构的 76%,已成为中国大气污染的主要来源。大力开发新能源和可再生能源的利用技术将成为减少环境污染的重要措施。能源问题是世界性的,向新能源过渡的时期迟早要到来。从长远看,太阳能利用技术和装置的大量应用,也必然可以制约矿物能源价格的上涨。中国太阳能较丰富的区域占国土面积的 2/3 以上,年辐射量超过 60 万焦耳/平方厘米,每年地表吸收的太阳能大约相当于 1.7 万亿吨标准煤的能量。因此,我国具有大规模开发可再生能源的资源条件和技术潜力,可以为未来社会和经济发展提供足够的能源保障,开发利用可再生能源大有可为。单晶硅、多晶硅的发电效率有望在较短的时间内,把发电效率提高到百分之二十以上。但目前来说,尽管太阳能电池板价格下降比较快,它发电的成本依然是火电的五倍多,投入商业运营还有漫长的路要走。

迄今,估计在大地上,每秒受到数十次的地闪。这是全球无时无刻不存在的约 2000 个雷暴活动的结果。除了一部分闪电打在无人、无人造物的旷野及海洋上外,还有一部分会对人和生物造成伤害,对各种建筑物、系统、部件或元件造成破坏。随着人类社会特别是经济的发展,雷电造成的危害亦有所变化。其总的的趋势是面变得广了,并且向微电子器件方面倾斜,绝对损失也在增加。这也说明防雷技术的相对落后^[1]。在回击阶段,对地放电的峰值电流可达几万安,其瞬时功率可在 $10^{11}W$ 以上。一瞬间,它将在其通路上造成强加热效应,在通过的大气(即通道)中可使空气温度瞬间升到 3 万摄氏度以上。能量以热能、机械能(包括冲击波、声波)及电磁能(包括光能)等方式散发出来。真正的地面消耗的仅是其中的一小部分。闪电在其回击通道及其贴近处产生强大的机械效应、接热效应,也可产生可波及较远处的电磁效应。其造成的危害及对它的抵御构成了人类与雷电间的密切关系。关于人类的伤亡,国内没有公布过数据。根据美国近几十年的统计,雷击在美国每年造成约 100 余人死亡,另有约 500 人受伤。这类伤亡,以户外受雷击为主。国外的研究也说明,城市化使得户外受害率在下降。随着工

业化，特别是电引入人类生活以来，雷击引起的破坏日趋严重。特别是，间接雷害，使破坏从点变成面而显得特别严重。如果雷击通过合格的避雷（实为引雷）系统入地，就不再会造成任何直接破坏。如果没有避雷（引雷）系统，或者由于某种原因避雷（引雷）系统不完善，这就会因雷击的能量耗散在不设防的地方而造成破坏。例如，1985年7月25日晚7点15分，雷击使上海市造纸工业公司北蔡仓库纸料堆垛着火，直接损失60万元；1994年4月7日晚，上海市郊青浦县商塌沙田湖的商塌针织厂遭雷击，使针织成品、缝纫机及半成品烧毁并因高温导致500多平方米的厂房倒塌，直接损失300余万元；1997年5月28日午夜，一次雷击使广东省开平市中源制衣厂起火，使总价110万元的成衣、布料及缝纫机化为灰烬；1998年8月22日21时，湖北南漳县化建公司所属炸药库被雷击引爆，22.5T铵锑炸药、146.5km导火索和近万枚雷管被炸毁，伤亡97人，倒塌房屋337间，直接经济损失800万元。这类雷害，是雷击通道的放电引燃了易燃物而导致成灾。受害空间附近的金属体（包括屋架、电源导线等）常成为有间隙的不完善而无意形成的引雷系统的一部分。2002年9月14日中午，乐东县佛罗镇腰果场、新安白和岸上园遭受雷电袭击。致使在一间工棚内休息的十几名工人全部被雷电击中，造成5人死亡，6人重伤，2人轻伤的重大伤亡事故。2003年8月11日17时，儋州市那大解放西路一私宅的避雷针遭雷击，雷击感应造成市内交通指挥系统和400多部电视机，60多部电脑，40多部空调机等大批电器损坏。直接经济损失140多万元。上述这类设备受雷击损坏日趋严重，其特点是不一定有外貌上明显的破损，但可瞬间击毁对电磁十分敏感的微电子元件，其间接损失涉及面广，往往比直接损失大几倍甚至几十倍。因此如何避免雷击就成为第一位了。避雷技术应用在当今社会生活的各个领域，它对雷电所产生的不安全因素起到了较好的保护作用。随着太阳能技术的普及和应用，将会出现大片光伏屋顶、光热系统等太阳能建筑，这对传统的避雷技术提出了许多新的课题和更高的要求。

雷电监控系统在雷电的规律性研究、雷电信息监测及相应的防护领域中起到重要的作用。雷电监控的主要任务是监测、预测、收集雷电灾害信息，供决策和有关部门利用。雷电灾害信息除具有一般信息的共同特征，即可用性、可处理性、可传递性以外，还具有其它特殊的标志和特征，所以雷电监控系统必须以下面一个特征作为出发点来设计。

（1）可预报性

随着大气科学和现代信息技术的发展，人类对各种雷电灾害发生发展规律的认识不断深入，雷电灾害的可预报性不断提高。雷电的发生往往伴随着暴雨、冰雹等天气现象，因此对雷电活动的监测也是预报其他自然灾害天气的有效手段。

（2）地区性

不同的雷电灾害在不同地区发生的频率和严重程度不同，决定了各地区间雷电灾害信息的重点不同。而太阳能光伏发电系统也因为其特点，而有不同的防雷电措施。

（3）易坏性

雷电灾害信息是实时性很强的信息。尤其是预测预报产品，时效一过就无使用价值。这就对提供雷电监控系统的处理速度和通信保障提出了更高的要求。

（4）滞后性

天气气候从正常向异常转变，到灾害性天气的出现，有一个过程，这就是自滞后性。所以要掌握雷电发生的规律及其损失的历史和现状，结合光伏发电系统的实际做出推断，提供准确信息，充分利用这种滞后性，作好防灾和减灾工作。

（5）连锁性

许多雷电灾害常常诱发其他灾害。所以雷电监控系统也必须对相应其他灾害的信息服务做好连贯有序。

目前，人类还不能很好的有效利用雷电，而面对雷电带来的危害，只能采取一定的预防性措施，减少雷击造成的损害。我国大部分的建筑物，都采用避雷带、避雷针和安装阀型避雷器等装置来防雷。雷电对太阳能光伏发电系统设备的影响，主要由以下几个方面造成：

直击雷：太阳能电池板大多是安装在室外屋顶或是空旷的地方，所以雷电很可能直接击中太阳能电池板，造成设备的损坏，从而无法发电。

传导雷：远处的雷电闪击，由于电磁脉冲空间传播的缘故，会在太阳能电池板与控制器或者是逆变器、控制器到直流负载、逆变器到电源分配电盘已经配电盘到交流负载等的供电线路上产生浪涌过电压，损坏电气设备。

地电位反击：在有外部防雷保护的太阳能供电系统中，由于外部防雷装置将雷电引入大地，从而导致地网上产生高电压，高电压通过设备的接地线进入设备，从而损坏控制器、逆变器或者是交、直流负载等设备^[2]。

如何让太阳能光伏发电技术和新型避雷技术有机地结合在一起，组成实用、美观、安全可靠的一体化避雷系统，是目前亟需研究并解决的重要课题。

防雷设施是保证太阳能光伏并网发电系统设备正常安全运行的关键，这要引起足够的重视。为了增大太阳电池板的采光面积，往往在高处安装，而忽视了避雷问题。由于太阳电池板的安装位置比较高，经常高于建筑物的避雷线，这样太阳能光伏并网发电系统遭受雷击的概率大大增加。

雷电是自然界中大气的放电现象。在全球范围内，每年发生在大气中的雷电达 31 亿次，平均每秒钟约为 100 次。2000 年，上海、浙江、福建发生电力雷击事件分别为 6 起、14 起、37 起，广东甚至高达 95 起，直接经济损失达 100 多万元，湖北为 4 起，直接经济损失为几十万元。据湖北省防雷中心统计资料介绍，

武汉是多雷暴活动区，年平均雷暴日数为 38 天，最多年份达 56 天。据统计我国每年雷击造成的直接经济损失近 10 亿元。

雷电对太阳能光伏发电系统具有极大的破坏性，其电压高达数百万伏，瞬间电流可高达数十万安培，雷击对太阳能光伏发电系统所造成的破坏性后果，将严重导致设备损坏，甚至人员伤亡。为此，在发展太阳能光伏发电时必须重视避雷问题，尤其在我国中南部和长江沿线一带的一些地区，由于空气潮湿，阴雨天气多，雷电活动频繁，更应注意避雷问题。如何让太阳能光伏发电技术和新型避雷技术有机地结合在一起，组成实用、美观、安全可靠的一体化避雷系统，是当今亟需研究和解决的课题。由此可见，本项目具有重要的科学意义和广阔的应用前景。

太阳能光伏并网发电系统雷电监控的意义：通过建立与光伏发电系统相关的雷电监控系统，对于掌握好雷电的特点、预防雷击的危害、有效保护光伏发电系统的各个组件等各个方面有巨大的实际意义。通过建设雷电监测网实时监测雷电的发生、发展及消亡过程，提供雷电灾害预警信息，服务于雷电灾害的防护。通过统计雷电日、雷电密度分布图，为光伏发电系统的雷电防护工程提供科学参数。

雷电监测系统将雷电探测仪组网进行监测，具有全天候监测、探测精度高等优点。从理论上讲，其核心是通过多个探测仪同时测量闪电回击辐射的电磁场来确定闪电源的电流参数：放电时间、发生的位置、强度峰值、波形陡度值、陡点时间和放电电荷等^[3]。

目前，几乎所有的发达国家和地区都布有全国和地区雷电监测定位网，为雷电的基础研究、防雷技术的开发、防雷减灾服务提供扎实完备的雷电监测数据资料，增强雷电灾害的预测评估能力和雷电事故判断的准确性。

1.2 国内外研究现状

太阳能发电系统主要由光伏阵列，蓄电池和光伏系统控制器或并网逆变器组成。目前太阳能光伏发电系统大致可分为两类，独立型光伏发电系统与并网型光伏发电系统。独立型光伏发电系统一般为光伏蓄电系统，因其系统比较简单，而且适应性强曾经被广泛使用，但由于系统中蓄电池体积大，寿命短而且维护困难，现已不适合大范围使用。并网型光伏发电系统中，当用电负荷较大，太阳电池发出的电能不够用时由电网补充，而负荷较小或太阳电池所生产的电力过剩时，就可将多余的电力卖给电网，这类系统省掉了蓄电池提高了系统灵活性，并降低了系统造价减少了损耗，从而使用的范围得以扩大，光伏并网发电系统已成为研究热点，是当今世界光伏发电的趋势。

以上从国际到国内，太阳能光伏发电比较迅速，发展势头强劲，市场前景看好，然而，对光伏发电系统可能遭受雷击的检测与监控考虑少，针对光伏发电系统的避雷措施很欠缺，才刚刚起步。可见，尽管太阳能光伏发电技术有了突飞猛

进的进步，但其防雷技术却未取得太大的进展。

20世纪70年代末，美国科学家Martin Auman和E Philip Krider提出并实现了现代雷电遥测定位技术，随后美国建立了覆盖全国的国家雷电监测网（NLDN）。20世纪80年代末，我国成功研制成雷电定位系统，使我国成为继美国之后第二个拥有雷电定位技术自主知识产权的国家。同时，日本等电网发达国家也进行了雷电监测系统的研发和建立工作。近年来，国内外不断研究出利用卫星装载光瞬变信号探测器（OTD）和闪电图像传感器（LIS）以及利用雷达等对雷电进行监测的新技术^[4]。

经过近20年的不断发展，目前我国已经在30个省（自治区、直辖市）建立了雷电定位系统，并实施了联网，形成了覆盖全国电网的雷电监测网。雷电监测网已有雷电探测站350个，是一个全自动、大面积、高精度、实时的雷电监测网络，能实时遥测并显示云对地放电（地闪）的时间、位置、雷电流幅值和极性、回击次数以及每次回击的参数。雷电监测网能在全国范围内实时监测雷电活动，掌握和记录雷电活动特征。

2008年12月26日，由国网电力科学研究院防雷技术研究所承担的国家电网公司“十一五”科技项目“电网雷电监测与防护关键技术攻关研究”和“输变电设备防雷技术与策略的研究”中期评审会在武汉顺利召开。“电网雷电监测与防护关键技术攻关研究”项目通过对雷电流测量技术、雷电辐射电磁场传播特性、新一代数字式雷电探测技术、雷电参数统计、电网防雷综合计算方法和工具、雷电屏蔽技术等关键技术进行研究，以获取目前全世界都普遍缺乏的实测雷电流参数（幅值/波前时间），提升我国电网雷电监测技术水平，掌握适用于我国电网防雷的雷电基础参数，提供有效、便捷的防雷性能分析工具，建立科学评价雷电屏蔽效能的试验方法。“输变电设备防雷技术与策略的研究”项目，掌握分析国内外电网防雷技术的水平和现状，提出电网差异化防雷技术和策略，编制国家电网公司输变电设备防雷技术导则，为公司系统输变电设备雷电防护的设计、施工、运行及维护提供技术支持与指导，改善以往因缺乏必需技术手段而造成的粗放的管理现状。这两个项目在国内首次大规模对电网雷电监测与防护技术及策略进行系统研究，较好地融合了雷电监测与防护的理论研究与实际应用，内容丰富，范围广泛，技术难度大。

太阳能光伏并网发电系统运行方式主要可分为离网运行（即独立太阳能光伏发电系统）、联网运行（联网太阳能光伏发电系统）和混合系统三大类。

联网太阳能光伏发电系统使太阳能光伏发电进入大规模商业化发电阶段，成为电力工业组成部分之一的重要方向，是当今世界太阳能光伏发电技术发展的主流趋势。太阳能并网光伏发电是光伏发电进入电力规模应用的必然结果，也是未来最大的光伏发电市场。目前我国已开始了屋顶并网光伏发电系统的试验和示范

工作以及大规模荒漠光伏并网系统的可行性研究。

对于离网运行和联网运行的太阳能光伏并网发电系统,对于它遭受雷击的检测与监控研究都还处在发展中。

而且,对于新兴的太阳能光伏并网发电系统,国家还没有相应的设计规范来说明光伏电站的防雷避雷措施。目前,只能根据国家的《建筑物防雷设计规范》(GB50057-94)及和电力系统相关避雷设计的规范来进行设计,由于光伏发电系统的特殊性,这样设计出来的结果会有较大的差异。雷电是一种不确定的自然现象,而光伏发电电站也是和其他一般的建筑物是有区别的,所以仅仅依据《建筑物防雷设计规范》来设计光伏电站的防雷系统是不准确的。光伏发电系统一般是在比较空旷的地方,而且高度相对不是很高,光伏电站里面的其他电气设备容易受到雷电的损害,应当区别对待其他的建筑物防雷规范。既不能以一般建筑物的防雷作为参考,也不能简单的以电力系统的防雷规范来设计。因此,必须考虑光伏电站所处地区的雷暴日数和电站的占地面积,结合避雷装置与发电系统,研究出适合太阳能光伏并网发电系统的避雷监控系统^[5]。

1.3 雷电监控存在的问题和差距

存在的问题和差距:目前我国光伏并网发电系统的雷电监控的研发能力不强,与发达国家相比,特别是高分辨率的雷电探测和综合资料的获取应用方面有很多差距,核心技术上缺少自主知识产权,而结合我国的地理位置,气候情况等不同需求的雷电防护产品还没有形成。在国内还没有雷电与相关学科结合的大型试验研究,对雷电的研究和技术开发没有形成规模,特别是防护技术方面的研究不够。另一方面,由于我国幅员辽阔,雷电现象的发生与地域特征有紧密的联系,而防雷技术还处于发展阶段,雷电监控的研究起步较晚,存在的很多科学技术问题都需要进一步的解决。因此,必须加强对雷电发生发展的基础理论研究,开展对光伏发电系统雷电灾害的分析和统计,把握光伏发电系统雷击灾害的规律,并做好相应的学科研究和实验,为进一步做好光伏发电系统的雷电监控系统做好准备。

其次,光伏并网发电系统的雷电监控涉及到多个学科,对相关行业的工作人员要求比较高,随着我国经济社会的快速发展,对雷电业务的需求也不断增加,培养高素质的雷电基础研究人才,特别是与光伏发电系统防雷相关的专业人才,也是相当重要的^[6]。

最后对光伏并网发电系统的防雷还缺少一个标准和规范,而这是指导光伏发电系统建设的有力保证。标准是科学、技术和实践经验的总结。加强标准、标准化工作及科学的研究以应对光伏行业的快速发展和变化。通过标准及标准化工作,以及相关技术政策的实施,可以整合和引导社会资源,激活科技要素,推动自主创新与开放创新,加速技术积累、科技进步、成果推广、创新扩散、产业升级以

及经济、社会、环境的全面、协调、可持续发展。制定符合我过实际情况的合理完善的雷电防护标准体系，并与国际标准体系接轨，并由相关的主管部门来管理，对于用户和生产企业也是有很大的益处的^[7]。

然而，现在由于不重视避雷装置的思想，光伏建筑物遭雷击的事故时有发生，造成了一些损失，光伏建筑物避雷装置存在的问题主要有以下几个方面。

（1）接闪器的连接不当

接闪器是将雷电流经引下线、接地体引入地下，因此，接闪器与引下线、引下线与接地体的连接必须焊接的很牢靠，这样才能最终保证安全地将雷电电流引入大地。但是，在实际的工程建设上，个别工程采用捆绑式的连接，或者焊接点太少，导致连接的不可靠，出现脱落和裂缝，这都会最后造成雷电电流不能安全引入大地。

（2）避雷带支起方式不正确

有时候接闪器采用避雷带，通常是避雷带沿屋檐或女儿墙支起 10~20cm，各个支点之间的间距为 1~1.5 m，即达到防雷效果又比较美观。但是，实际的工程中，出现支点间距很大，这样避雷带就不能被平直的支起，就达不到避免振动的效果。

（3）明装引下线固定不好

引下线是沿着光伏建筑物的外墙，经过最短的线路接入大地。引下线的各个固定点的间距不能大于 2m，而且要有一定的松紧度。有的工程甚至将引下线穿入雨水管中，或者和雨水管固定在一起，这样的做法很容易发生事故，引起雷击，十分危险。

（4）引下线数量不符合要求

光伏建筑物一般占地面积较大，对引下线的数量要求较多，一旦引下线的数量不够，对雷电流的分流就少，导致经过每根引下线的电流较大，容易产生反击和其他事故。

（5）未设置断接卡

为了保证工程的质量，需要测量接地电阻，并检查引下线、接地体的连接状况，合适的做法是在各个引下线距地面 1.8m 以下的地方设置断接卡。个别工程未设置断接卡，就无法测量接地电阻并检查引下线和接地体的连接情况。

（6）接地线处没有保护措施

雷电电流高达几万、甚至几十万伏特的高压，人接触引下线就会发生触电事故。所以必须对地面上 1.7m 至地面下 0.3m 的这段接地线加以保护，一般是采用绝缘材料包扎。但是很多建筑物的接地线裸露在外面，存在雷击事故的安全隐患。

1.4 雷电

雷电这一自然现象瞬变万千，通常所谓雷击是指一部分带电的云层与另一部

分带异种电荷的云层，或者是带电的云层与大地之间迅猛的放电。这种迅猛的放电过程产生强烈的闪交并伴随巨大的声音。当然，云层之间的放电主要对飞行器有危害，对地面上的建筑物和人、畜没有很大影响。然而，云层对大地的放电则对建筑物、电子电气设备和人、畜危害甚大，这是我们要研究的主要对象。产生雷电的条件是雷雨云中有积累并形成极性。雷电分直击雷、电磁脉冲、球形雷、云闪四种。

通常雷击有三种主要形式：其一是带电的云层与大地上某一点之间发生的迅猛放电现象，叫直击雷；其二是带电云层由于静电感应作用，使地面某一范围带上异种电荷，即当直击雷发生以后，云层带电迅速消失，而地面某些范围由于散流电阻大，以致出现局部高电压，或者在直击雷放电过程中，强大的脉冲电流对周围的导线或金属物发生电磁感应而产生高电压以致发生闪击的现象，叫做二次雷，或称感应雷；其三是球形雷，这是一种特殊的雷电现象，简称球雷。

雷电是一种自然界中超长间隙的放电现象，按雷电的发展方向可区分为下行雷和上行雷两种，前者是在雷云中产生并向大地发展的；而后者是由接地物体的顶部激发并向雷云方向发展的。雷电的极性是按照雷云入地的电荷极性区分的，统计表明 90% 以上的雷是负极性雷。在雷电放电过程中沿着雷电通道将流过幅值最高可达几百千安，延续时间近百微秒冲南海电流。如此巨大的雷电流对于人们的生产和生活会造成很大危害，例如，对于电力系统而言，当雷电流超过相应的耐雷水平将导致线路绝缘的闪络，会造成线路的接地故障。雷电波的折反射将造成很高的过电压，破坏设备绝缘，造成跳闸停电事故。为了减小雷电的危害性，人们对雷电现象进行了长期、大量的研究，并采用了避雷器，避雷针等防雷设备，甚至开始使用颇有争议的消雷器。

1.5 雷灾特点

雷电以其巨大的破坏力给人类社会带来了惨重的灾难，尤其是近几年来，雷电灾害频繁发生，对国民经济造成的危害日趋严重。为此应当加强防雷意识，做好预防工作，将雷害损失降到最低限度。当人类社会进入电子信息时代后，雷灾的特点与以往有极大的不同，可以概括为：

(1) 受灾面在不断扩大，从电力、建筑这两个传统领域扩展到几乎所有行业，特别是与高新技术关系最密切的领域，如航空航天、国防、邮电通信、计算机、电子行业、石油化工以及金融证券等。

(2) 从二维空间入侵变为三维空间入侵。从闪电直击和过电压波沿线传输变为空间闪电的脉冲电磁场从三维空间入侵到任何角落，无孔不入地造成灾害，因而防雷工程已从传统防直击雷、防感应雷进入现代的防雷电电磁脉冲（Lightning Electromagnetic Pulse, LEMP）阶段。前面是指雷电的受灾行业面扩大了，这里是指雷电灾害的空间范围扩大了。

(3) 雷灾的经济损失和危害程度大大增加了, 它袭击的对象本身的直接经济损失有时并不太大, 而由此产生的间接经济损失和影响却是难以估计的。

为此, 当今光伏发电系统防雷工作的重要性、迫切性和复杂性大大增加了, 雷电的防御已从直击雷、感应雷防护发展到了整体的系统防护, 必须站到新高度来认识和研究现代防雷技术, 提高人类对雷灾防御的综合能力。

毫无疑问, 准确地了解雷电流特性(波形及其幅值)对于防雷研究来说是至关重要的。遗憾的是, 以往人们受测量手段和仪器的限制, 无法记录自然界中随机产生并且稍纵即逝的雷电流波形。因此, 至今为止我们尚未见到有关实际记录到雷电流波形的报道。随着高速数字采样和计算机技术的发展, 对雷电流波形进行随时自动监测成为可能^[8]。

评价某一地区雷电活动的强弱时, 习惯上使用“雷暴日”, 即一年当中该地区有多少天发生耳朵能听到的雷鸣来表示该地区的雷电活动强弱, 雷暴日的天数越多, 表示该地区雷电活动越强, 反之则越弱。中国部分城市年平均雷暴日的分布如表 2.1 所示。

表 2.1 中国部分城市年平均雷暴日分布

地名	年雷暴日数	地名	年雷暴日数	地名	年雷暴日数	地名	年雷暴日数
北京市	36.3	上海市	28.4	黄石市	50.4	昆明市	63.4
天津市	29.3	南京市	32.6	长沙市	46.6	漓江县	75.6
石家庄市	31.2	杭州市	37.6	永州市	64.9	景洪县	120.8
承德市	43.7	温州市	51.0	广州市	76.1	拉萨市	68.9
张家口市	40.3	合肥市	28.2	深圳市	73.9	日喀则市	78.8
太原市	34.5	屯溪市	60.8	珠海市	64.2	西安市	15.6
大同市	42.3	福州市	53.0	湛江市	94.6	兰州市	23.6
呼和浩特市	36.1	三明市	57.5	桂林市	78.2	银川市	18.3
集宁市	43.3	南昌市	56.4	梧州市	93.5	乌鲁木齐市	9.3
沈阳市	26.9	鹰潭市	70.0	成都市	34.0	阿克苏市	33.1
长春市	35.2	济南市	25.4	西昌市	73.2	海口市	104.3
吉林市	40.5	郑州市	21.4	贵阳市	49.4	台北市	27.9
哈尔滨市	32.4	武汉市	34.2	遵义市	53.3	香港	34.0

1.6 雷击的危害

雷电有两个放电参数: 一个是起主要破坏作用的雷电流, 常达几十安到几十万安, 其作用时间极短; 另一个是雷电流的上升速度, 通常称为陡度, 其值在 1~80kA/μs 之间。雷电的危害都是由以上两个放电特性引起的, 一个完整的太阳

能光伏并网发电系统的防雷方案包括两个方面，即直接雷的防护和感应雷的防护，两者缺一不可。

1.6.1 直击雷的危害

雷电放电主通道通过被保护物称作被保护物被直击雷击中。直击雷以强大的冲击电流、炽热的温度、猛烈的冲击波以及强烈的电磁辐射损坏放电通道，直接击在光伏阵列或机房建筑物上，因电效应、热效应和机械效应等而造成光伏建筑物等损坏以及人员伤亡。

直击雷防护主要是使用避雷针、避雷带、导地体和接地网，再加上主体钢筋而形成一个笼式的框架及所谓“法拉第网”笼式的框架，如果要达到理想的效果，在没有避雷针的情况下，必须在最高位布有不大于 $10m \times 10m$ 的金属网络，整座建筑物的金属体(如水管、天线等)都要与这个笼式框架相连接，以达到理想的防雷保护作用。

为了尽量减少感应雷的产生。一般宜采用抑制型或屏蔽型的直击雷保护措施，如避雷带、避雷网和避雷针等，以减小直击雷击中的概率。直击雷防护装置，它由接闪部分，引下线和接地装置组成，是防止直击雷的有效措施，它们将雷电经引下线导入地下，从而保护在其覆盖范围内的工作人员、电气设备、线路和建筑物，免遭直击雷击。因而接闪器设计必须满足高性能、安全可靠的要求。

PT-限流避雷针对雷电流具有衰减作用，减弱雷电流的泄流强度，从而减弱周围电磁感应强度，使附近地区的金属线路和电子设备受到干扰的程度大大降低。雷电发生闪击后，PT-限流避雷针能有效地将可能发生的几千安到上百千安的雷电流变成数千安入地。避免了传统避雷针接闪后的强电流入地产生的二次效应，减弱了大电流入地出现的反击和强电磁干扰产生的感应过电压^[9]。

PT-先导避雷针是将雷电提前先导并泄入大地，使被保护物免遭直接雷击的防雷装置，避雷针安装一定要高于被保护物，一般安装在建筑物顶的铁塔或杆塔上。PT-先导避雷针能在雷云电场的作用下，产生提前先导通道，使雷电在保护范围内发生闪击时能准确地闪击在避雷针上，避免了传统避雷针的“侧击”和“绕击”现象。因 PT-先导避雷针的入地电流也较少，所以它是防直击雷的理想设备。

1.6.2 感应雷的危害

雷电放电主通道没有经过被保护物，但放电过程中产生强大的瞬变电磁场在附近的导体中感应到电磁脉冲，称为感应雷。感应雷在雷云之间放电或雷云对地放电时，在附近的户外传输信号线路、埋地电力线、设备间连接线上产生电磁感应并侵入设备，使串联在线路中间或终端的电子设备遭到损害。感应雷虽然没有直击雷猛烈，但其发生概率比直击雷高得多。当雷云层之间以及雷云与大地之间放电时，在放电通道周围产生的电磁感应、雷电电磁脉冲的辐射以及雷云电场的

静电感应，使光伏建筑物上的金属部件、管道、钢筋和有户外进入室内的电源线等感应出高电压，并通过这些线路引入室内造成电子设备损坏。显然，感应雷危害是大面积的。

由于感应雷可以来自云中放电，也可以来自对地雷击，而太阳能光伏发电系统与外界连接有各种长距离电缆可在更大范围内产生感应雷。并沿电缆传入机房和设备，所以防感应雷是太阳能光伏发电系统防雷的重点。

感应雷主要通过电源线、信号线或数据线入侵而破坏电子设备，所以感应雷的防护是要在各种线路的进出口安装适当的防雷器。静电感应产生的感应雷，一般通过电力电缆和通信电缆的金属外皮和天馈线侵入系统。所以对于连出电缆防雷防护的主要措施有以下 3 种。

一是进出电缆必须带金属屏蔽层，且应埋地进出建筑物，并在进出户外电缆金属外屏蔽层与联合接地体作等电位联结。

二是在电源上逐级加装避雷器，实行多级防护，使感应雷在经过多级泄流后的残压小于电站设备的耐压值。

三是在建筑物内的设备综合布线保护管宜采用金属管。

避雷器的防雷能力与安装方式有密切关系，主要是因为引线阻抗会产生额外的残压。应尽可能缩短电力线与避雷器间的连线以及避雷器与接地汇流排板间连线的长度。多级布置避雷器可减小引线阻抗产生的额外残压，因为前级避雷器已将大部分雷电流泄放入地，在后级避雷器中泄放的雷电流较小^[10]。

1.7 雷电监控系统的方案措施

光伏并网发电系统遭受的雷击多是下行雷，主要来自 2 个方面：一是雷直击在光伏电站的电气设备上；二是架空线路的感应雷过电压和直击雷过电压形成的雷电波沿线路侵入光伏电站。因此，防护直击雷和雷电波对光伏电站进线及变压器的破坏十分重要。

对于太阳能光伏并网发电系统的雷电监控系统来说，主要是防止直击雷、雷电感应和雷电波侵入，因此，针对不同的雷电危害方式，采取相对应的防雷措施与技术方法。

(1) 光伏电站厂区直击雷防护计算

保护半径 r_x 计算公式为：

$$r_x = \sqrt{h(2h_x - h)} - \sqrt{h_x(2h_r - h_x)}$$

式中： h ——避雷针高度

h_x ——被保护物高度

h_r ——滚球半径

(2) 光伏电站太阳电池阵列防护方案

光伏电站的太阳能阵列都是安装在户外，主要防的是直击雷，避雷针是主要的防雷设备，通过科学的计算，选择合理可靠的防雷设备，使得户外的光伏电站太阳能阵列能够得到有效的防护。所以要选定避雷针的型号及性能指标，关键的问题就是要计算好太阳能电池阵列每年的预计雷击次数，并利用滚球法计算出避雷的范围，从而有效的防护光伏电站的太阳能电池阵列^[11]。

相关的参数确定后，计算出太阳电池阵列年预计雷击次数，计算公式为：

$$N = KN_g A_e$$

式中： K ——校正系数

N_g ——光伏阵列所处地区雷击大地的年平均密度（次/km².a），

(其中： $N_g = 0.024T_d^{1.3}$)

T_d ——年平均雷暴日数，根据省气象台、站资料确定 (d/a)

A_e ——与光伏阵列截获相同雷击次数的等效面积 (km²)

$$A_e = [LW + 2(L+W) \times \sqrt{H(200-H)} + \pi H(200-H)] \times 10^{-6}$$

(其中 L 、 W 、 H 分别为光伏阵列的长、宽、高)

太阳电池板四周铝合金框架与支架导通连接，所有支架均采用等电位连接接地，接地电阻 $R_g \leq 4\Omega$ ，在土壤的高电阻地区也不能大于 10Ω 。

太阳电池板是太阳能发电系统的核心部分，一组电池阵列由两层钢化玻璃夹着，由于真空的钢化玻璃夹层本身就是绝缘体，所以当雷击发生时，雷击电流经过太阳电池板的铝合金框架及金属支架泄入大地，从而使太阳能电池板得到保护，避免直击雷冲击而损坏。

太阳能电池板背面的直流电压引出导线采用 $BV-4mm^2$ ，导线的脉冲绝缘耐压 (1.2/50μs) 大于 30kV，与供电系统设备之间达到绝缘配合。

太阳能电池方阵的高度远低于 220V/380V 架空输出电线杆高度，该电杆接地可以作为电池方阵的避雷防护措施之一。

此外，当直击雷或云间雷发生时，可能产生的静电感应过电压和磁感应过电压，根据计算分析，也不会对电池板内部回路以及电池板本身产生冲击损坏。

综上所述，本防护方案可以达到对太阳电池方阵的雷电防护，并且经济、可行。

① 对雷电感应的防护措施。

将光伏电站机房内的全部金属物，包括设备金属外壳、机架、金属管道、电缆金属外皮等接地部分，而且要将所有金属物专用的接地线单独接入接地干线。

② 对雷电波侵入的防护措施。

由于架空导线、金属管道和光伏阵列到机房的引入线的引导作用，雷电波沿着这些管道侵入机房内，对机房内的人和电气设备造成损害。因此，改进一下避雷方案，采取多级防护措施对太阳能光伏并网发电系统进行保护。在太阳电池方阵接线箱内安装防雷模块；保持太阳电池方阵接线箱与控制柜间距大于 10m；在控制器、逆变器内安装防雷元器件，使其具有防雷保护功能；在交流输出端，改变以往设计中在架空出线杆上安装低压阀式避雷器的做法，改用更加灵敏、安全、方便的浪涌保护器即防雷模块；防雷器件全部安装于防雨防尘的电源箱内，固定在架空出线杆上，防止雷电波由输电线路进入机房^[12]。

③ 避雷接地体的设置与选择。

单独设置工作接地（主接地）体，在满足接地电阻要求的同时，各种不同用途和不同电压的电气设备接地部分全部接入主接地体。此外，为了避免太阳电池方阵、供配电系统和架空线输电系统之间的地电位反击，需将太阳能电池板四周铝合金边框、支架、供配电设备外壳保护接地、架空电线杆接地等采用环形等电位连接接地。

2 雷电特性

2.1 雷电流参数

雷电放电参数是防雷设计的重要依据。雷电放电参数包括主放电通道阻抗、雷电流波形、雷电流幅值概率分布、雷电流极性、重复放电次数及对地输送的电荷量等。

尽管某一次雷击的电流幅值是随机的,但经对大量实测的雷电流幅值进行统计分析,可得其概率分布曲线。不同地区的雷电流幅值分布是不同的,这主要与地区的纬度、地形、地貌、气象和雷暴强度有关。我国电力行业标准 DL/T620-1997 (2) 综合了我国几十年的雷电观测结果,对雷暴日超过 20 的地区,雷电流幅值的概率分布推荐采用:

$$\lg P = -I / 8 \quad \text{式 (2.1)}$$

其中 P 表示幅值等于和大于 I (kA) 的雷电流概率, I 表示雷电流幅值 (kA), 对雷暴日在 20 及以下的地区, 概率分布较小, 推荐采用 $\lg P = -I / 44$ 。按惯用法进行反击计算时, 根据变电站防雷可靠性要求, 选取某一累积概率下的幅值^[13]。雷电波幅值概率如表 2.2 所示。

表 2.2 雷电波幅值概率

概率	10%	5.3%	3.5%	1.4%
幅值	176kA	200kA	216kA	250kA

雷电的破坏作用与峰值电流及其波形有着密切的关系。雷击的发生、雷电流大小与许多因素有关,其中主要的有地理位置、地质条件、季节和气象。其中气象情况有很大的随机性,因此研究雷电流大多数采取首先进行大量观测记录,然后用统计的方法寻找出它的概率分布的方法。

世界各国测得的对地放电雷电流波形基本一致,多数是单极性重复脉冲波,少数为较小的负过冲。一次雷击放电过程常常包含多次先导至主放电的过程(分第一次放电和随后放电)和后续电流。实际上通过防雷保护器的雷电流为一连串周期为几百微秒的脉冲电流。综合各国观测结果,一次雷击有多次雷电流脉冲,一般为 2~3 个,最多纪录到 42 个,多数是单极性的重复脉冲,约 85% 的雷电流(脉冲)波头为 1~5μs,平均为 2.6μs。雷电流(脉冲)波长为 20~350μs。所以在工程选用时,视其敏感性而定^[14]。

2.1.1 双指数函数形式

有了雷电流的几个特征参量后,为了进一步对雷电进行预测和研究可以用简单的数学表达式来描述典型的雷电流波形。1941 年 Bruce 和 Golde 提出了双指数

形式的数学表达式：

$$i(0,t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \frac{I_0}{\eta} [\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)], & t \geq 0 \end{cases} \quad \text{式 (2.2)}$$

式中 $\eta = \exp(-\alpha t_p) - \exp(-\beta t_p)$ 为峰值电流的修正因子， $t_p = \ln(\beta/\alpha)/(\beta - \alpha)$ 为峰值时间（通过求解 $\frac{di}{dt} = I_0(\beta \exp(-\beta t_p) - \alpha \exp(-\alpha t_p)) = 0$ ，可以得到 t_p 值）。把 t_p 代入式 (2.2) 中可求得峰值电流为：

$$I_m = I_0 \left[\exp \left[-\frac{\alpha}{\beta - \alpha} \ln \frac{\beta}{\alpha} \right] - \exp \left[-\frac{\beta}{\beta - \alpha} \ln \frac{\beta}{\alpha} \right] \right] \quad \text{式 (2.3)}$$

我们假设半峰值时间为 t_h ，则有：

$$\frac{1}{2} I_m = \frac{I_0}{\eta} (\exp(-\alpha t_h) - \exp(-\beta t_h)) \quad \text{式 (2.4)}$$

从上面式子中可看出 I_m 不仅与 I_0 有关，而且与 α 、 β 有关， t_p 和 t_h 与 α 、 β 也有着复杂的数学关系。如果 I_0 、 α 和 β 都已知，根据式 (2.2)，可作出雷电流的波形图，从图中我们同样可以确定 I_m 、 t_p 和 t_h 的值。

这里我们根据建筑物防雷设计规范国家标准 GB50057-94 选取 10/350μs 的雷电流波形， τ_1 和 τ_2 为波头和波尾时间常数，取 $\alpha = 1/\tau_2$ ， $\beta = 1/\tau_1 \cdot \exp(-\alpha t_p)$ 决定了函数图形的衰减部分， $\exp(-\beta t)$ 决定其上升沿^[15]。

2.1.2 Heidler 函数 (IEC 推荐雷电流解析表达式)

国际电工委员会 (IEC) 在其 1995 年的文件 IEC1312-1 中，规定了供分析用的雷电流解析表达式：

$$i(0,t) = \left[\frac{I_0}{\eta} \right] \left[k_s^n / (1 + k_s^n) \right] \exp(-t/\tau_2) \quad \text{式 (2.5)}$$

式中： I_0 为峰值电流， η 为峰值电流修正系数（在 $n \gg 1$ 、 $\tau_2/\tau_1 \gg 1$ 时，取 $\eta \approx 1$ ）， $k_s = t/\tau_1$ ， n 是电流陡度因子，这里取 $n=10$ 。这是基于霍德勒 (Heidler) 模型和传输线模型提出的，使用与首次雷击 (10/350μs) 和后续雷击 (0.25/100μs) (国际 GB50057-94 (2004 年版))。

同样, 我们取 10/350μs 的雷电流波形做仿真, 对应所给定的常数和式 (2.5), 可计算得到: $t_p = 31.48\mu s$ 、 $t_h = 371.2\mu s$ 、 $di/dt = 27.32 kA/\mu s$ 。

这里 Heidler 函数图形的上升沿由 $k_s^n / (1 + k_s^n)$ 决定, 而指数项 $\exp(-t/\tau_2)$ 决定了其衰减部分, Heidler 模型中, 雷电流的各种特征值能在函数和其图形中得到很好的反映。

2.1.3 脉冲函数形式

雷电的放电回击过程可以由简单的天线模型来模拟。由这一模型得到关于雷电的电磁场表达式中的静电场项与回击电流的时间积分有关。因此在进行雷电电磁场的计算中, 都涉及到复杂的重积分运算, 工作量巨大。双指数函数在 $t=0$ 时没有连续的一阶导数, 而 Heidler 函数又没有明显的积分式^[16]。

为了克服这种困难, 提出了用式 (2.6) 形式的脉冲函数模型来表示雷电电流。

$$i(0, t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \frac{I_0}{\eta} [1 - \exp[-t/\tau_1]]^n \exp[-t/\tau_2], & t \geq 0 \end{cases} \quad \text{式 (2.6)}$$

其中峰值修正因子, $\eta = (1 - t_\alpha)^n t_\alpha^{\tau_1/\tau_2}$, $t_\alpha = \tau_1 / (\tau_1 + n\tau_2)$ 容易证明 $di(0, t)/dt$ 在 $t=0$ 时为 0, 且连续可导。

将式 (2.6) 中的 $[1 - \exp[-t/\tau_1]]^2$ 展开, 可得到:

$$[1 - \exp[-t/\tau_1]]^2 = \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k n!}{k!(n-k)!} \exp(-kt/\tau_1) \quad \text{式 (2.7)}$$

脉冲函数展开式 (2.7) 中的第一项 ($k=0$ 时) 是决定脉冲函数衰减的主要项。

2.2 系统方案的选择

世界正朝着数字化的方向发展, 而数字信号处理器正是这个数字革命的心脏。TI 公司推出的 TMS320 数字信号处理 (Digital Signal Processing, DSP) 家族覆盖了非常广的应用领域。用户必须充分理解各类数字信号处理器的特点和适用领域, 才能选择合适的处理器完成数字信号处理或控制任务。根据不同的应用领域, TI 公司推出了三大指令集架构, 一般称为“平台”。平台的指令核心是互相兼容的, 但各平台有自己的特点和适合的应用领域。主要考虑处理速度、功耗、程序存储器和数据存储器的容量、片内的资源, 如定时器的数量、I/O 口数量、中断数量、DMA 通道数等。

2.2.1 TMS320C2000 系列数字信号处理器平台

DSP 系统的硬件设计是在考虑算法需求、成本、体积和功耗核算的基础上完成的，首要的关键因素是如何对数字信号处理器选型，选择处理器时需要根据性能、成本、集成度、开发的难易程度以及功耗等因素进行综合考虑。TI 公司现在主推的系列 DSP：

(1) C5000 系列（定点、低功耗）：C54X，C54XX，C55X 相比其他系列的主要特点是低功耗，所以最适合个人与便携式上网以及无线通信应用，如手机、PDA、GPS 等应用。处理速度在 80MIPS—400MIPS 之间。C54XX 和 C55XX 一般只具有 McBSP 同步串口、HPI 并行接口、定时器、DMA 等外设。值得注意的是 C55XX 提供了 EMIF 外部存储器扩展接口，可以直接使用 SDRAM，而 C54XX 则不能直接使用。两个系列的数字 I/O 都只有两条。

(2) C2000 系列（定点、控制器）：C20X，F20X，F24X，F24XX，C28X 该系列芯片具有大量外设资源，如：A/D、定时器、各种串口（同步和异步），WATCHDOG、CAN 总线/PWM 发生器、数字 I/O 脚等。是针对控制应用最佳化的 DSP，在 TI 所有的 DSP 中，只有 C2000 有 FLASH，也只有该系列有异步串口可以和 PC 的 UART 相连。

(3) C6000 系列：C62XX，C67XX，C64X 该系列以高性能著称，最适合宽带网络和数字影像应用。32bit，其中：C62XX 和 C64X 是定点系列，C67XX 是浮点系列。该系列提供 EMIF 扩展存储器接口。该系列只提供 BGA 封装，只能制作多层 PCB。且功耗较大。同为浮点系列的 C3X 中的 VC33 现在虽非主流产品，但也仍在广泛使用，但其速度较低，最高在 150MIPS。

TMS320C2000 系列 DSP 控制器，具有很好的性能。集成了 Flash 存储器，高速 A/D 转换器以及可靠的 CAN 模块，主要应用于数字化的控制。TMS320C2000 系列既有带 ROM 的片种，又有带 Flash 的片种。TMS320C2000 系列 DSP，是比 8 位和 16 位微控制器 MCU 速度更快，更灵活，功能更强的微控制器^[17]。

TMS320C2000TMDSP 平台整合了高性能的 DSP 内核、内部 Flash 存储器、高精度模拟外设、数字控制及通信外设等。为用户提供了单芯片实现高性能控制的解决方案。所以雷电监控系统采用 TMS320C2000TMDSP 平台作为核心控制单元。

2.2.2 TMS320F2812

随着 16 位 DSP(数字信号处理器)的广泛应用，其价格也越来越低，无论是在通信产品上还是在数字控制领域都占有越来越多的份额。片上标准通信端口可为主机、测试设备、显示器及其他组件提供简便的通信端口。TMS320F2812 高速的运算能力、强大的实时处理能力和高度集成化的设计结构，使得它在控制领

域内得到了人们的亲睐。

TMS320F2812 与现有 240x 系列 DSP 控制芯片代码兼容的同时，具有处理性能更强、外设集成度更高、存储器容量更大以及 A/D 转换速度更快等特点，是 240x 系列 DSP 芯片的升级产品。TMS320F2812 的功能框图如图 2.2 所示。

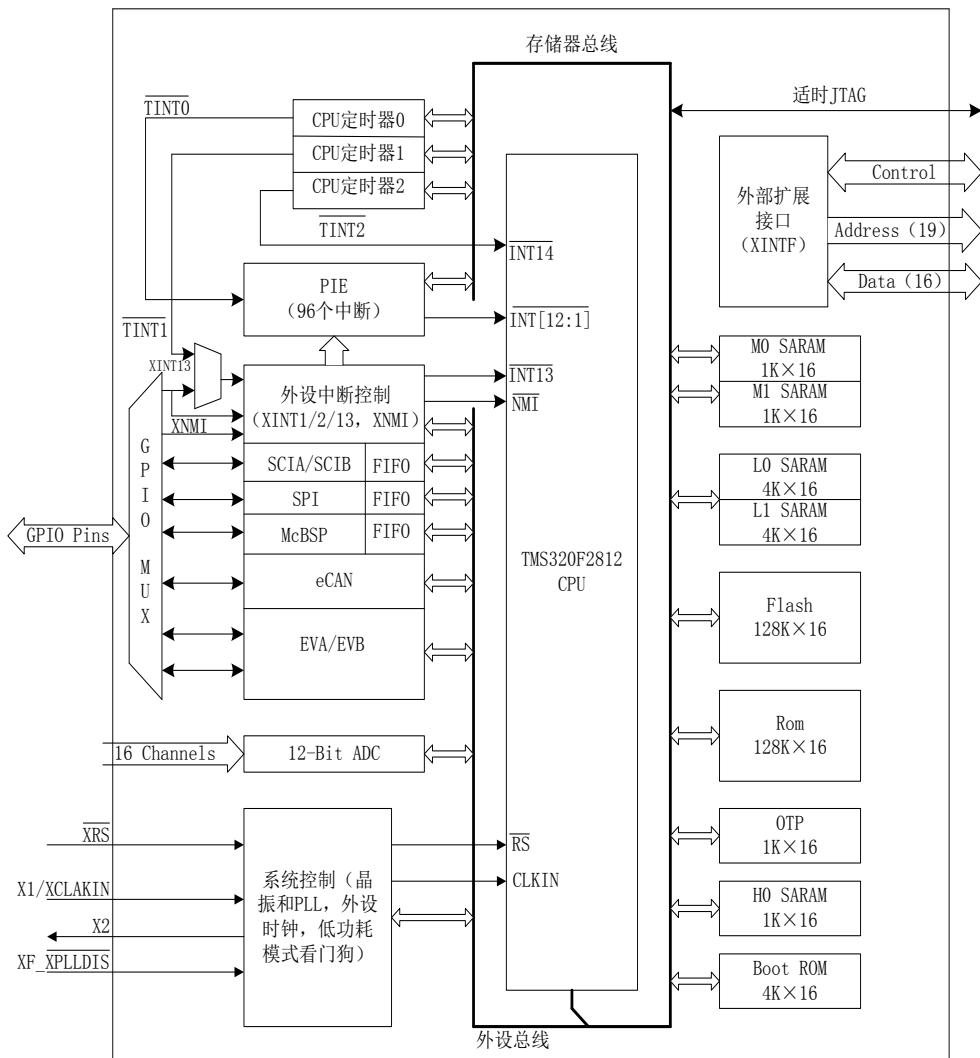


图 2.2 TMS320F2812 的功能框图

TMS320F2812 片上外设极其丰富，不仅包括多种类型的存储器，还包括：JTAG 边界扫描接口、外部扩展接口、时钟和系统控制电路、外围中断扩展模块、3 个 32 位 CPU 定时器、2 个事件管理器、2 个异步通信接口 SCI 串行外设接口 SPI、增强型 CAN 总线、SPI 模式的多通道缓冲串口 McBSP、12 位 16 通道 A/D 转换器、56 个独立可编程的多路通用输入/输出 (GPIO) 引脚等。本系统采用 TI 的 DSP 芯片 TMS320F2812 作为信号采集和处理的核心，通过片上自带的 12 位 ADC 进行采集。采集后的数据暂时存储在片内存储器中，通过串行异步通信接口 SCI 传输到上位机，上位机将以文件形式存储采样数据。

TMS320F2812 芯片的性能如下：

(1) 高性能静态 CMOS 技术。

150MHz (6.67ns 时钟周期); 低功耗设计 (核心电压 1.8V@135MHz, 1.9V@150MHz, I/O 接口核心电压为 3.3V); Flash 编程电压为 3.3V。

(2) 高性能 CPU

16 位×16 位和 32 位×32 位的乘和累加操作; 双 16 位×16 位的乘和累加单元 (MAC); 哈佛总线结构; 强大的操作能力; 迅速的中断响应和处理能力; 统一的存储器编程模式; 可达 4M 字的线性程序/数据地址; 代码效率高 (用 C/C++ 或汇编语言); 与 TMS320F24x/LF240x 处理器的源代码兼容。

(3) 片上存储器

多达 128K×16 位 Flash 存储器 (4 个 8K×16 位和 6 个 16K×16 位的扇区); 1K×16 位的 OTP 型只读存储器; L0 和 L1: 两个 4K×16 位的单口随机存储器 (SARAM); H0: 一块 8K×16 位 SARAM; M0 和 M1: 两块 1K×16 位 SARAM。

(4) 引导 ROM (4K×16 位)

带有软件的引导模式; 标准的数学表。

(5) 外部接口

容量高达 1.5M 的存储器; 可编程等待状态; 可编程读/写选通计数器; 四个独立的片选端。

(6) 时钟和系统控制

支持动态的锁相环倍率调整; 片上振荡器; 看门狗定时器模块。

(7) 三个外部中断

(8) 外部中断扩展 (PIE) 模块

可支持 45 个外部中断。

(9) 三个 32 位 CPU 定时器

(10) 保护 Flash/OTP 和 L0/L1 SARAM; 防止 ROM 中的程序被解密。

(11) 电动机控制外围设备

两个事件管理器 (EVA、EVB); 与 240xA 器件兼容。

(12) 串行接口外围设备

串行外围设备接口 (SPI); 两个串行通信接口 (SCI), 标准的 UART; 增强型局域网络控制器 (eCAN); 多通道缓冲串口 (McBSP)。

(13) 12 位 ADC, 16 通道

两个 8 通道的输入多路转换器; 两个采样保持器; 单个/双路同步采样; 高速通道转换速率: 80ns/12.5MSPS。

(14) 最多有 56 个可编程通用输入输出 (GPIO) 引脚

(15) 高的仿真性能

分析和设置断点的功能; 实时的硬件调试功能。

(16) 开发工具

ANSI C/C++编译器/汇编器/连接器；支持 TMS320*24x/20x 指令；代码编辑集成开发环境；DSP BIOS；JTAG 扫描控制器（TI 或者第三方）；评估板；广泛的第三方数字电动机控制支持。

（17）低功耗模式和节能模式

支持空闲模式、等待模式和挂起模式；独立的停止外围设备的时钟。

（18）封装形式

带外部接口的 179 引脚球形触电 BGA 封装（GHH、ZHH）；带外部接口的 176 引脚低剖面四方扁平 LQFP 封装（PGF）；不带外部接口的 128LQFP 封装（PBK）。

（19）工作温度范围

A:-40°C~+85°C；S/Q: -40°C~+125°C。

3 雷电监控系统硬件设计

3.1 雷电监控系统总体方案

在太阳能光伏并网发电系统中，避雷的可行性在于变被动引雷为主动引雷。我们知道，各种避雷针实际上都是“引雷针”，将高空的雷电流接引入地底下释放电荷，这是被动引雷，被保护的太阳能光伏并网发电系统，仍然处于危险之中。如图 3.1 所示为太阳能光伏并网发电系统雷电监测系统原理图。

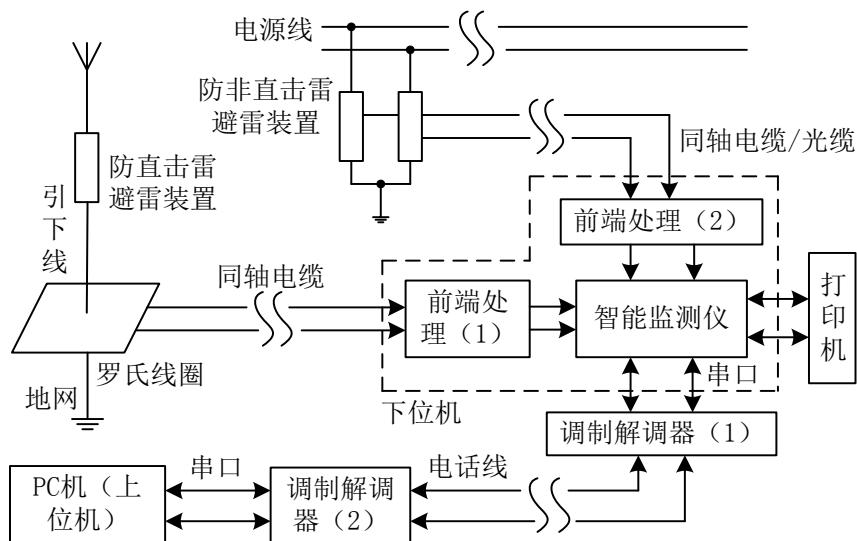


图 3.1 雷电监测系统原理图

避雷控制系统负责检测每次直接雷击避雷装置动作后入地脉冲电流的强度、雷击电压的极性、雷击次数的计数以及各个防非直接雷避雷装置的动作损坏情况。它可以根据上位机的指令，将各种数据传给上位机进行相应处理；也可以根据用户的按键命令，进行复位、显示和打印简单报表等操作^[18]。在下位机中，智能监测仪的前端处理由两个部分组成：一部分是防直击雷的避雷装置发挥作用后，检测相关参数的变化；另一部分是防非直接雷避雷装置发挥作用后的损坏情况。

防直击雷的装置是接闪器，前端处理（1）中采用罗哥夫斯基（以下简称为罗氏）线圈作为探头来检测直接雷击，采用罗哥夫斯基（以下简称为罗氏）线圈。罗氏线圈布置在防直击雷避雷装置的接地引下线上，将较强的电流信号转变成弱的小电流信号，然后隔离开。在罗氏线圈的中心，从上到下垂直通过避雷装置的接地引下线，由于罗氏线圈的频率响应很好，流过避雷装置的雷电流波形就是它输出的波形，从罗氏线圈输出的电流的幅值和雷电流的幅值是呈正比的。进入前端处理（1）的信号，其信号电压高达几十伏甚至上百伏，必须要进行两极变换的处理后才能送入智能监测仪做进一步处理：首先是进行分压变换，目的是将信

号的电压降到 $\pm 0.1V \sim 10V$ ；然后是进行非线性变换，将 $\pm 0.1V \sim 10V$ 的信号电压变换为 $\pm 0.3V \sim 5V$ 的信号电压，这样做的目的是便于 A/D 采样并去掉噪声电平的干扰。前端处理（1）输出的信号分成两部分，一部分用来测量雷电波形的极性和峰值的电压；另一部分用来给 DSP 提供中断信号和防直接雷避雷装置的信号，采用触发电路和保持电路来实现。如果任一部分遭受直接雷击，就触发了 DSP 的信号中断，通过中断服务程序来判断具体遭受直接雷击的避雷装置的数量，然后读入遭雷击的信号，经过 A/D 转换后存储在内存单元中，等待主程序的处理，雷击的次数进行累加，一旦加满，就再从 1 开始循环累加计数。经过这一系列的处理后退出中断程序，此时主程序会将相应的信息显示出来。只要保证不断电或者重新按复位按钮，最新一次雷击的相关信息就会一直显示。

来自防非直接雷避雷装置（如电源避雷箱）的防雷接口信号，通过同轴电缆或光缆接入前端处理（2）中。在送入智能监测仪的接口电路进行处理之前，需经过过压保护电路和光电隔离电路，如果在遭受雷击后避雷装置雷击仍能正常工作，则智能监测仪检测到的是高电平信号，如果避雷装置遭受雷击后损坏，智能监测仪将会检测到低电平信号，必须马上更换避雷装置。因为罗氏线圈一般安装在户外，离智能监测仪还比较远，所以罗氏线圈的出口信号要使用 50Ω 的同轴电缆连接前端处理（1），这是为了防止波形的失真。连接了同轴电缆后，电缆上的感应雷电电流可能会进入监测仪里面，必须将连接信号输入端的同轴电缆的屏蔽层进行可靠接地，前端处理（1）和智能监测仪机箱的金属外壳也要进行接地保护。由于智能监测仪的信号输入端加有过压保护电路，监测仪里面电路板的数字地和其他的模拟接地要分开，最好都是单独通过一条粗导线与地网可靠连结，避免各种误操作损坏电子器件。

整个智能监控系统的上位机采用 PC 机，并作为整个监测系统的数据库管理中心，比如雷击次数、雷击电流强度、雷击电压极性、避雷装置损坏更换情况等雷击信息，都是由该部分负责统计显示。整个光伏发电系统管辖区域内，各个区域内的避雷装置的位置、工作情况和工作状态，都可以模拟显示出来，并能够打印具体的实时记录报表和历史数据报表。在一些无人值守的地方，预先设置电话报警来实现无人监控^[19]。

3.2 雷电流检测模块



图 3.2 雷电流自动监测系统工作原理图

图 3.2 是雷电流自动监测系统的工作原理图，它主要是由电流传感器（罗氏线圈），高速 A/D 转换，PC 机 3 部分组成。当雷电流通过避雷器接地线时，套

在接地线上的罗氏线圈中感应出电压信号, 经 A/D 变换及其 PC 机处理后存入硬盘, 以便工作人员随时查询并调用。

图 3.3 是采样电路的原理框图。我们采集的雷电流波很可能是微秒级瞬态过程, 因此采样电路的核心是 DSP 芯片自身 A/D 转换来实现的, 其采样率最高可达到 20M Samples, 即每微秒得到 20 个数据点, 以保证足够的波形精确度。采样电路的原理框图如下图 3.3 所示。

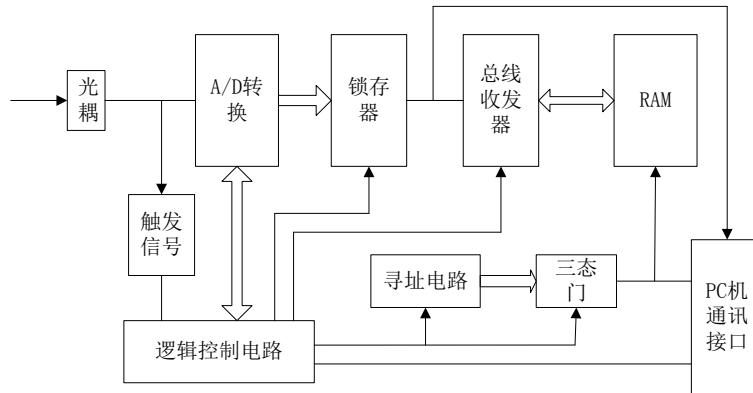


图 3.3 采样电路的原理框图

为了确保每次采样的数据都能迅速无误地存入 RAM 中, 电路的寻址方式是通过硬件寻址实现的。采用专用的寻址电路, 它由一些 74 系列的门电路和计数器组成, 通过特殊的电路配合使其能与高速采样电路的执行速度相匹配^[20]。

罗哥夫斯基线圈 (Rogowski Coil, 罗柯夫斯基线圈, 简称罗氏线圈), 罗氏线圈是一种空心环形的线圈, 有柔性和硬性两种, 可以直接套在被测量的导体上来测量交流电流。考虑到雷电是一个大电流(幅值最高可能达几百 kA)、微秒量级的瞬态放电过程, 雷电的特点是放电电压高、电流幅值大、电流变化快、放电过程时间短、电流波形陡度大, 雷电流所具有的这些特点使得采集雷电流会比较困难。罗氏线圈超过其他类型的电流互感器。由于罗氏线圈有一个空芯, 而不是一个铁芯, 它具有低电感, 并能顺应瞬息万变的电流。无二次开路危险; 可测量不规则导体; 安装方便, 无须破坏导体; 此外, 因为它没有铁芯饱和, 它是高线性度, 甚至承受更大电流。一个正确的形成罗柯夫斯基线圈, 与同样距离的绕组, 在很大程度上是免疫电磁干扰, 罗氏线圈是一个电动装置测量交流电或高速电流脉冲。它是一个空芯线圈, 穿在直导体的电流上是测量作业。通过采用一个专用的积分器将线圈输出的电压信号进行积分可以得到另一个交流电压信号, 这个电压信号可以准确地再现被测量电流信号的波形。

罗氏线圈电流互感器采用柔性电流传感器作为采集电流传感器, 可以测量频率几赫兹到 1M, 从几安培到几百千安培。其具有极佳的瞬态跟踪能力, 可以用于测量尺寸很大或形状不规则的导体电流^[21]。

罗氏线圈是一种空心环形的线圈, 直接套在被测量的导体上。导体中流过的

交流电流会在导体周围产生一个交替变化的磁场，从而在线圈中感应出一个与电流变比成比例的交流电压信号。线圈的输出电压可以用公式 $V_{out}=M\frac{di}{dt}$ 来表示。其中 M 为线圈的互感， $\frac{di}{dt}$ 则是电流的变比。

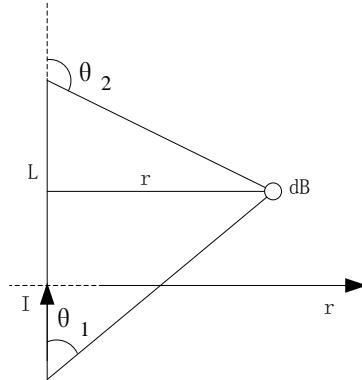


图 3.4 载流导线在空间任一点的磁感应强度

如图 3.4 所示，设真空中长度为 L 的载流导线，通过电流 I ，则该电流在空间任意一点的磁感应强度 B 为：

$$B = -\frac{\mu_0 I}{4\pi r} (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \quad \text{式 (3.1)}$$

—— μ_0 为真空磁导率。且磁感应强度方向与载流导线中的电流方向符合右手螺旋定则。

一般情况下，当导线长度 L 与该点到导线之间的距离关系符合 $L > 5r$ 时，就可认为该导线是无限长导线。此时， θ_2 近似等于 π ， θ_1 近似等于 0，因此，上式可写为：

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad \text{式 (3.2)}$$

且磁感应强度方向与载流导线中的电流方向符合右手螺旋定则。

在罗氏线圈法测量电流系统中，罗氏线圈相当于一个电流互感器测量系统，其一次侧为单根载流导线，二次侧为罗氏线圈。单根导线位于线圈的中心，线圈上绕线均匀。

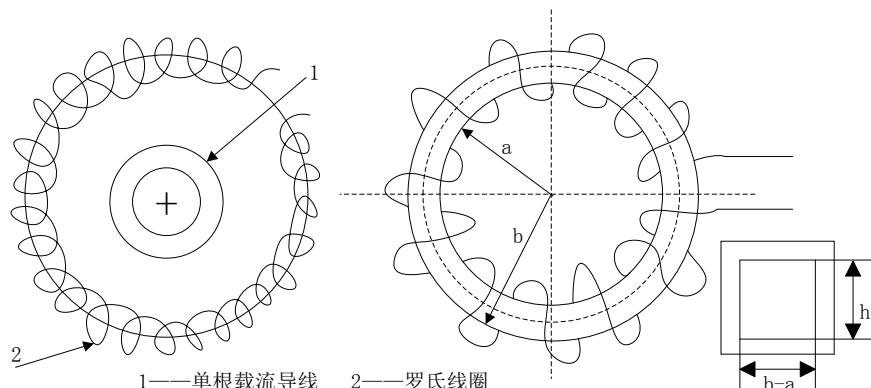


图 3.5 罗氏线圈原理图

罗氏线圈原理图如图 3.5 所示。线圈截面和载流导线处于垂直位置。

在实际应用中, 线圈所围绕的单根载流导线的长度总是远大于线圈内径, 被测导线可以近似看作无限长导线。因此, 由前述所知, 距离载流导线 r 的任一点处产生的磁感应强度为:

$$B = \frac{\mu_0 i(t)}{2\pi r} \quad \text{式 (3.3)}$$

式中 $i(t)$ 为被测电流。

由法拉第电磁感应定律可得:

$$e(t) = -\frac{d\Phi(t)}{dt} = -\frac{N\mu_0 h}{2\pi} \ln \frac{b}{a} \frac{di(t)}{dt} \quad \text{式 (3.5)}$$

在式 (3.5) 中, 令

$$M = -\frac{N\mu_0 h}{2\pi} \ln \frac{b}{a} \quad \text{式 (3.6)}$$

则式 (3.5) 即为

$$e(t) = M \frac{di(t)}{dt} \quad \text{式 (3.7)}$$

当线圈结构一定时, 线圈侧面高度 h 、小线圈总匝数 N , 小线圈内径 a 、外径 b 即为定值, μ_0 也不变, 因此, M 即为一个常量。

对上式两端积分, 可得

$$i(t) = \frac{1}{M} \int e(t) dt \quad \text{式 (3.8)}$$

因此, 对罗氏线圈两端的输出电压积分即可还原出被测电流^[22]。

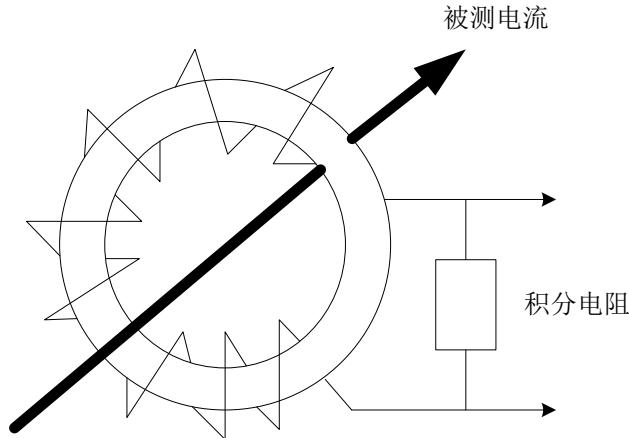


图 3.6 自积分式罗氏线圈工作原理图

如图 3.6 所示, 罗氏线圈是基于电磁感应定律工作的, 即: 被测电流产生的变化磁场在罗氏线圈中感应出电压信号, 因而该线圈和被测电流在电路上没有直接的联接, 这有利于 A/D 采样电路和 PC 机的安全运行。通过选择合适的线圈结构参数(环型骨架直径和材料、线圈截面、匝数、积分电阻等), 它可测量幅值从

十安培到数百千安培，上升时间可从毫微秒到毫秒的电流^[23]。

对于波形已知的被测电流，由罗氏线圈的结构参数，可以从理论上估算波形的测量误差，这是设计罗氏线圈时必需进行的工作。但是，最终的波形误差还得通过实验标定。对于国标规定的 8/20 以标准雷电流波，用美国 Pearson 公司的标准线圈进行的实验标定表明，研制的罗氏线圈误差小于 1.5%。另外，该电流传感器的工作范围为 100A~100kA^[24]。

3.3 TMS320F2812 模数转换模块

TMS320F28xADC 模块对连接到 ADC 输入引脚的信号进行模数转换。ADC 的输出的数字信号替代输入的模拟信号，并将转换后的信号值存储在数字信号处理器寄存器中。用这个模块去捕捉并数字化来自信号发生器、频率发电机或音频设备的模拟信号^[25]。

TMS320F2812 的 ADC 模块的功能框图如图 3.7 所示。

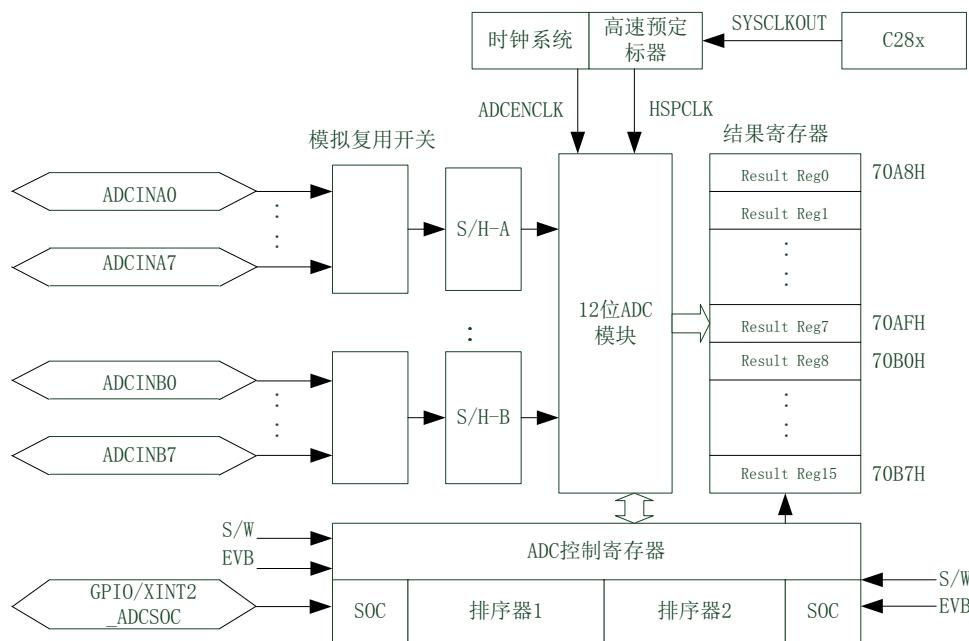


图 3.7 ADC 模块功能框图

TMS320F2812 的 ADC 支持通过 ADC 偏移微调寄存器 (ADCOFFTRIM) 中的 9 位字段进行偏移校正。对此寄存器中包含的值进行加/减后，结果才会出现在 ADC 结果寄存器中。本操作包含在 ADC 模块中，因此不会影响结果的时序。F2812 的 ADC 序列发生器由 2 个独立的 8 状态序列发生器 (SEQ1 和 SEQ2) 组成，也可以级联成一个 16 状态序列发生器 (SEQ)。ADC 模块具有若干预分频器级，以产生任何所需的 ADC 操作时钟速度。ADC 支持 3 个不同的电源，每个电源由 ADCTRL3 寄存器中独立的位控制。这 3 位组合形成了 3 个功率级别：ADC 上电、ADC 断电和 ADC 关闭。ADC 也可以运行于同步采样模式或顺序采

样模式^[26]。

两个 8 通道模块能够自动排序，每个模块可以通过多路选择器（MUX）选择 8 通道中的任何一个通道。在级联模式下，自动排序器将变成 16 通道。对于每个通道而言，一旦 ADC 转换完成，将会把转换结果存储到结果寄存器（ADCRESULT）中。自动排序器允许对同一个通道进行多次采样，用户可以完成过采样算法，这样可以获得更高的采样精度^[27]。

为获得更高精度的模数转换结果，正确的 PCB 板设计是非常重要的。连接到 ADCINxx 引脚的模拟量输入信号线要尽可能地远离数字电路信号线。为减少因数字信号的转换产生的耦合干扰，需要将 ADC 模块的电源输入同数字电源隔离开。图 3.8 为模数转换的硬件电路图。

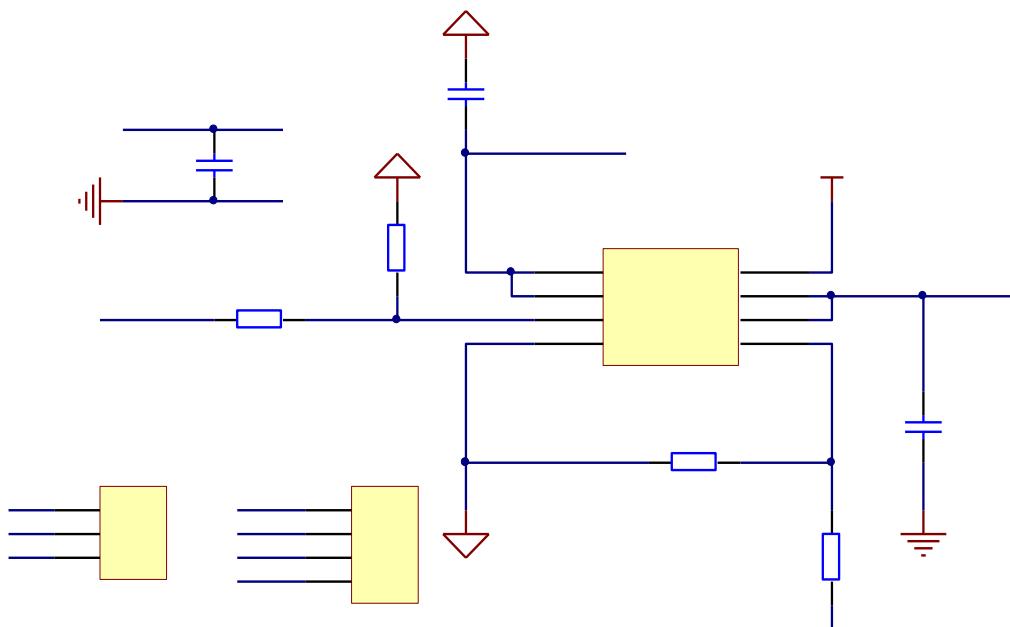


图 3.8 模数转换的硬件电路图

3.4 DSP 外围电路设计

3.4.1 电源电路设计

F2812 采用 3.3V 的外设供电和 1.8V 的内核供电，本系统采用 TI 公司的芯片 TPS75733 和 TPS76801，将电路板外接的+5V 转换成+3.3V 和 1.8V，电源输出+12V，+5V 和-5V 的电压。F2812 芯片需要 I/O(3.3V) 先上电，内核(1.8V)后上电，这与 TI 其他型号 DSP 的上电次序不同，因此在电源电路的设计中要格外注意。

本系统电源电路设计如图 3.9 所示，在左边的 TPS75733 使能端接地，即一直都是使能的，当其 2 管脚 IN 有+5V 的输入信号时，4 管脚 OUT 输出+3.3V 电压，此时为 F2812 的 I/O 供电；与此同时，TPS75733 的管脚 5 置低，使能 TPS76801，输出为两个 OUT 管脚（管脚 5 和 6），得到+1.8V，为 DSP 的内核供电。为了使输入电源更稳定，对于前端输入的+5V 电压，用 47uF 的电容对它进行滤波，同样

为了使 DSP 的供电电源更稳定，我们对两片电源芯片的输出电源也做了滤波处理，分别在+3.3V 和+1.8V 处用 10uF 的电容滤波。

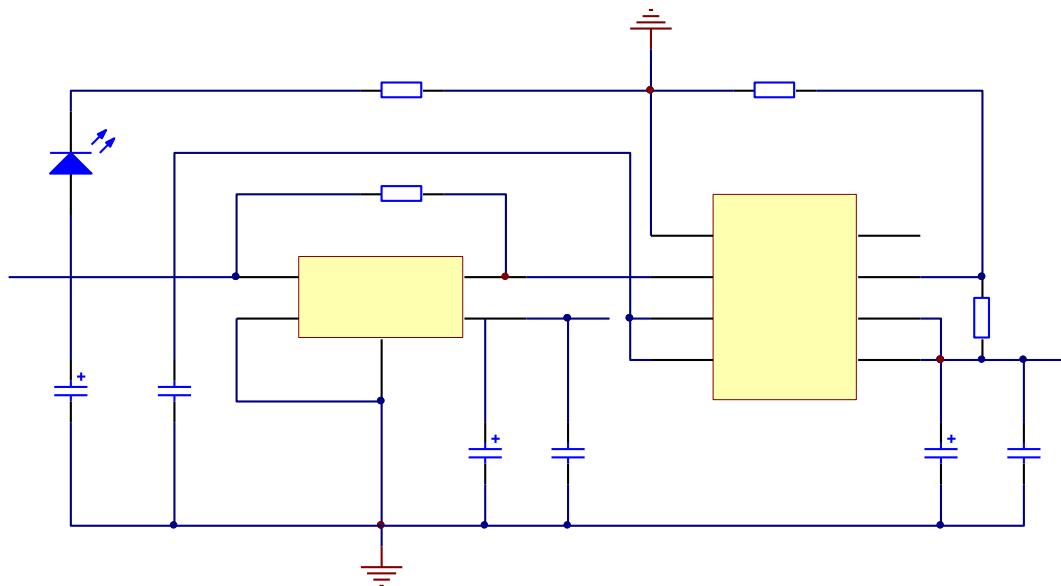


图 3.9 DSP 的电源供电电路

此外为了方便观察电源的通断，在电源的输入端设置了电源指示灯 LED，在+5V 电源输入时二极管 LED 将发光。为了系统的稳定和保护 DSP 的目标出发，选用两片电源芯片来严格上电顺序，可延长系统使用寿命，提高系统的安全性和稳定性^[28]。电源电路设计时要注意数字地和模拟地分开，避免公共地阻抗对模拟信号和数字信号产生耦合作用，模拟电源和数字电源之间可用电容隔开。

3.4.2 时钟电路

对于 F2812 数字信号处理器，可通过配置相应的控制寄存器来设置系统的时钟、锁相环、看门狗及低功耗模式等。DSP 和其他的微处理器一样，需要晶振才能工作，F2812 芯片内含一个基于可编程 PLL(Programmable Phase. Locked Loop) 的时钟模块，该模块为芯片提供了所有必要的时钟信号，还提供了低功耗方式的控制入口，用来选择不同的 CPU 时钟速率。如图 3.10 所示为 TMS320F2812 内部的各种时钟电路。

TMS320F2812 处理器片上有基于 PLL 的时钟模块，为器件及各种外设提供时钟信号。锁相环有 4 位倍频设置位，可以为处理器提供各种速度的时钟信号。时钟模块提供两种操作模式，如图 3.11 所示。

内部振荡器：如果使用内部振荡器，则必须在 X1/XCLKIN 和 X2 两个引脚之间连接一个石英晶体。

外部时钟源：如果采用外部时钟，可以将输入的时钟信号直接接到 X1/XCLKIN 引脚上，而 X2 悬空。在这种情况下，不使用内部振荡器^[29]。

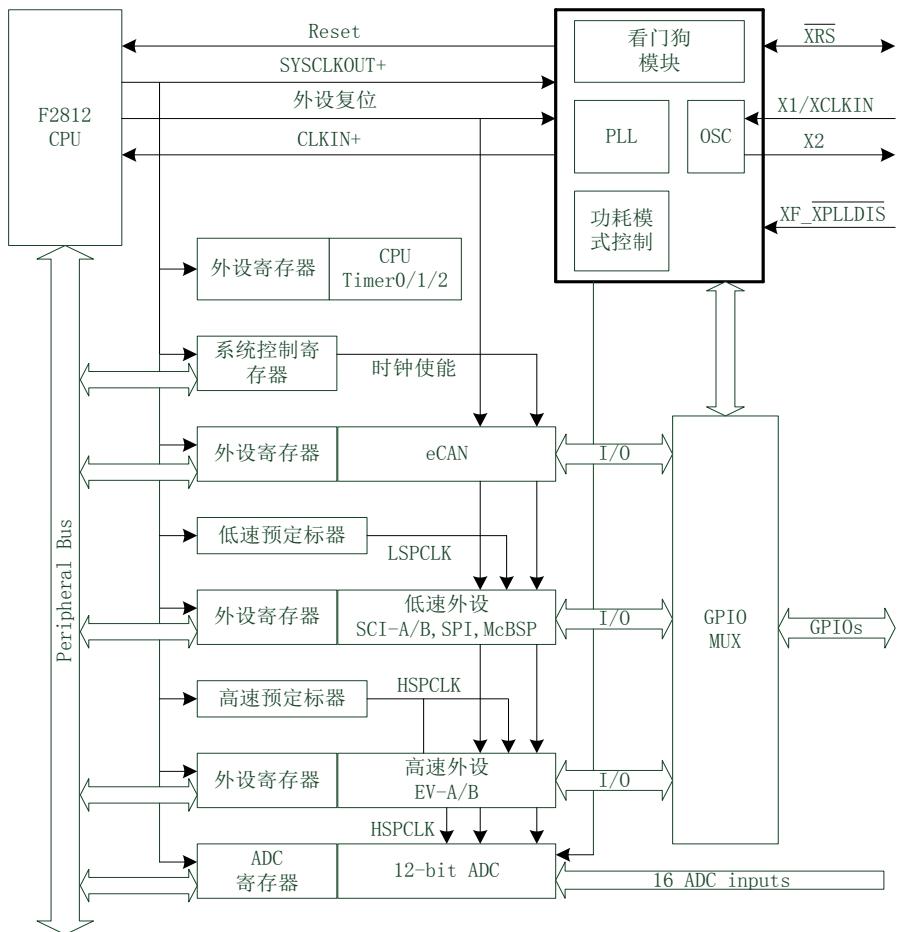


图 3.10 TMS320F2812 内部的各种时钟电路

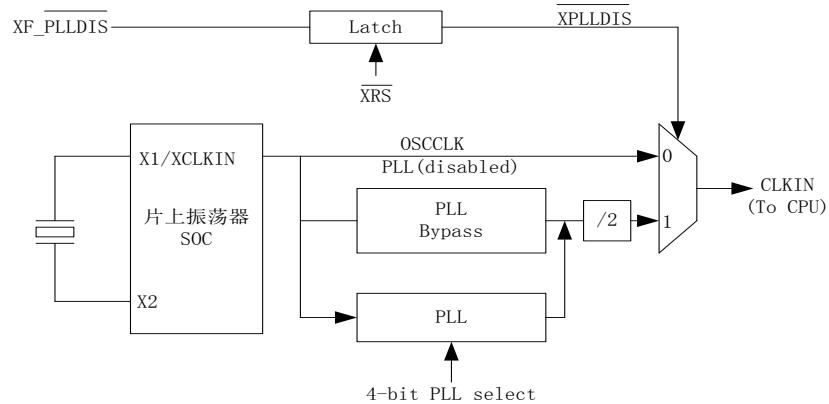


图 3.11 晶体振荡器及锁相环模块

外部 XPLLDIS 引脚可以选择系统的时钟源。当 XPLLDIS 为低电平时，系统直接采用外部时钟或晶振直接作为系统时钟；当 XPLLDIS 为高电平时，外部时钟经过 PLL 倍频后，为系统提供时钟。系统可以通过锁相环控制寄存器来选择锁相环的工作模式和倍频的系数^[30]。

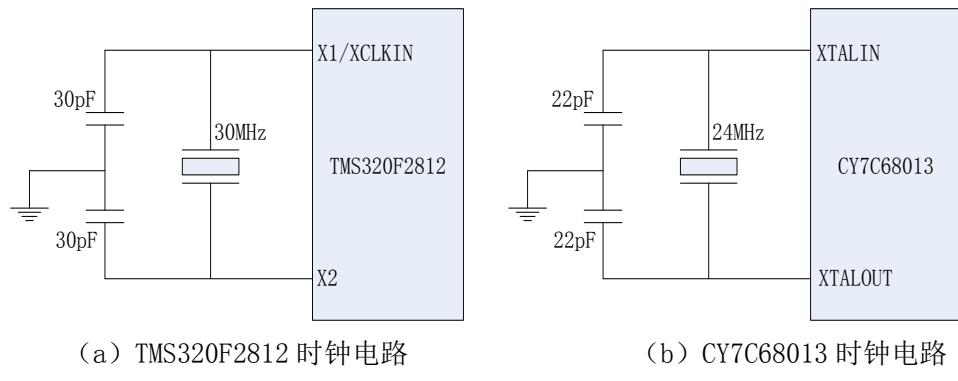


图 3.12 系统的时钟电路

系统的时钟电路如图 3.12 所示。在设计时钟电路和设置时钟倍频时, 要注意切忌使倍频系数与外部时钟源频率的乘积大于 F2812 的最高主频 150MHz, 否则芯片将不能正常工作。对于 68013 芯片, 我们选用了 24MHz 的晶振通过内部倍频的方式使芯片达到理想的工作频率。CY7C68013 用自己的片内晶振电路和一个外部 24MHz 晶振组成系统的时钟电路。它有一个片内锁相环(PLL)电路, 利用 PLL 可以把 24MHz 振荡器频率倍频至 480 MHz 供收发器使用。XTALIN 和 XTALOUT 分别为晶振的输入和输出引脚, 分别与晶振相连, 同时, 晶振的两个引脚分别通过一个 22pF 的负载电容接地。

3.4.3 复位电路

复位电路在系统的电路设计中是非常重要的。系统中手动复位的电路如图 3.13 所示。

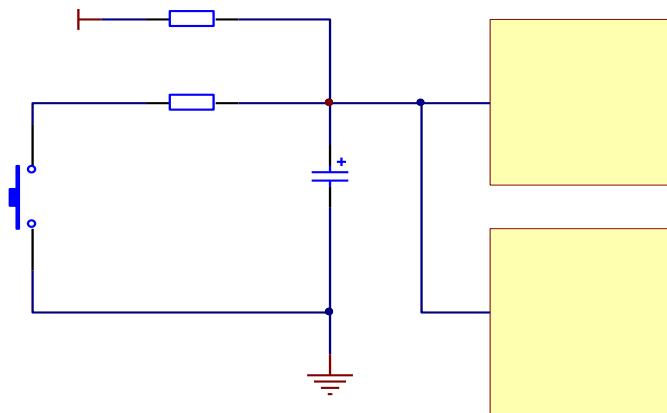


图 3.13 系统复位电路

刚刚给芯片上电时, F2812 芯片处于复位状态。当 F2812 芯片的 160 管脚 XRS# 地时, 也起到复位的功效。原理如下: 当按钮 SW1 按下时, 电容 C 上的电荷将通过按钮串联的电阻 R 放走, 使电容 C 上的压降为 0, XRS# 为低电平, 系统复位器件终止运行, PC 指向地址 0x3F FFC0; 当按钮松开时, 3.3V 的电压对电容 C 充电, 充电完成后, XRS# 置为高电平, 复位结束, 实现了手动复位, 程序从 PC 所

指出的位置开始运行。复位电路的电阻不能太大，否则电流达不到要求，复位失败。XRS#还是看门狗复位输出铃脚，当看门狗产生复位时，DSP 将该引脚驱动为低电平，看门狗产生复位期间，低电平将持续 512 个 XCLKIN 周期^[31]。

当复位信号被确认后, F2812 的处理器进入了一个确定的状态。作为硬件复位的一部分, 所有当前操作均被放弃, 流水线被清除, CPU 的寄存器都进行复位, 然后复位中断向量被取回, 从而执行相应的中断服务程序。复位程序引导(boot)完成后, 用户需要重新初始化 PIE 中断向量表, 应用程序使能 PIE 中断向量表, 中断将从 PIE 向量表中获取向量。需要注意的是, 当器件复位时, 总是从向量表中获取复位向量。复位完成后, PIE 向量表将被屏蔽。这个电路也同时为 68013 芯片提供了复位信号^[32]。

3.4.4 JTAG 电路设计

同单片机的应用系统一样，一个完整的 DSP 应用系统必须具有仿真器的标准接口，通过这个接口，用户可以通过 PC 调试、下载应用软件到指定的应用板。

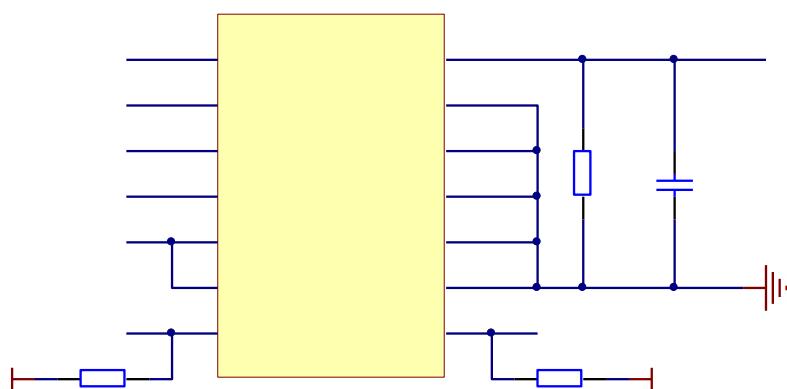


图 3.14 JTAG 接口电路

TI 公司的 DSP 芯片提供片上仿真支持, 使 CCS 能控制程序的运行并实时监视程序的活仿真器提供与主机通信的 JTAG 口, 主机与目标 DSP 通信是通过 JTAG 接口来完成的, 这种连接方式对 DSP 目标系统的实时性能没有太大的影响, 片上仿真硬件提供以下功能:

- (1) 运行、停止或复位 DSP 芯片；
 - (2) 将代码和数据加载到 DSP 芯片中；
 - (3) 检查硬件指令或数据相关的断点；
 - (4) 各种计算功能，包括精确到指令周期的剖切 (Profile) 功能；
 - (5) 提供主机和目标系统间的实时数据交换。

一般情况下，在系统成功应用之前，我们要做大量的调试工作，以确保板卡件程序正常工作，为了方便软件调试，JTAG 接口尤为重要，只有 JTAG 接口设置好，才能通过仿真器被 CCS 识别，从而进行大量的仿真测试实验^[33]。如图 3.14

是 F2812 的 JTAG 接口电路。

在保证电路设计正确的前提下, 还要注意以下几点: 要求安装仿真器的计算机与 DSP 应用系统可靠共地; 禁止带电插拔脚接头; 正确的操作顺序是先退出计算机系统的仿真窗口, 然后再将 DSP 应用板断电, 否则可能出现仿真器不能正常运行的情况^[34]。

3.5 串行通信

DSP 要与外界的器件和功能模块进行数据交换、信息传递, 就必须通过相应的通信接口实现, 串行通信协议根据同步方式的不同, 可以分为两种类型: 一种叫同步通信 (SYNC), 另一种叫异步通信 (ASYNC)。在该系统中采用串口异步通信。

3.5.1 异步通信

异步通信是指以一个字符为传输单位, 通信中两个字符间的时间间隔是不固定的, 然而在同一个字符中的两个相邻位代码间的时间间隔是固定的。图 3.15 为异步通信示意图。

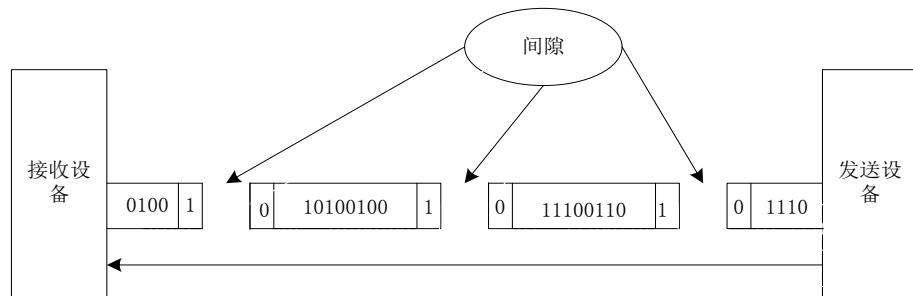


图 3.15 异步通信示意图

异步协议的特点是一个字符一个字符的传输, 并且以传送一个字符为基本周期, 常称为一帧。在一帧中, 传送一个字符总是以起始位开始, 以停止位结束, 字符之间没有固定的时间间隔要求^[35]。图 3.16 为异步通信的数据格式。

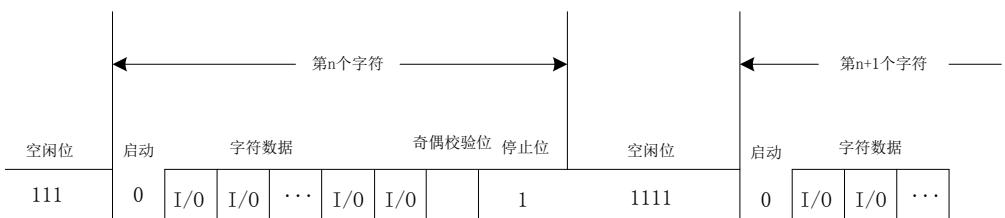


图 3.16 异步通信的数据格式

各位的意义如下:

空闲位: 当没有数据在传输线上传送时, 传输线将处于逻辑“1”的状态, 称空闲位。

起始位: 当传输线处于空闲位时, 若发出一个逻辑“0”的信号, 则表示开始传输字符, 该逻辑“0”信号称起始位。

数据位：起始位之后紧接着就是数据位，其个数可为 5、6、7、8 等。

奇偶校验位：位于在数据位之后，对数据传送的正确性进行校验。

停止位：位于奇偶校验位之后，表示一个字符数据传送结束。停止位可以是 1 位、1.5 位、2 位的高电平^[36]。

3.5.2 串行通信接口电路

F2812 的串行通信接口(SCI)是一个采用发送、接受双线制的异步串行接口，即通常所说的 UART 口，它支持 16 级的接收和发送 FIFO，从而降低了串口通信时 CPU 的开销。SCI 支持 CPU 和其他使用非归零(NRZ)的外围设备之间进行数字通信。在不使用 FIFO 的情况下，SCI 接收器和发送器采用双级缓冲模式，此时 SCI 接收器和发送器都有独立的使能和中断位，也都可以设置成独立操作或同时进行的全双工通信模式^[37]。SCI 信号描述如表 3.1 所示。

表 3.1 SCI 信号描述

信号名称	描述
外部信号	
RXD	SCI 异步串行数据接收信号
TXD	SCI 异步串行数据发送信号
控制信号	
通信速率时钟	低速外设定标时钟
中断信号	
TXINT	发送中断
RXINT	接收中断

SCI 模块的接收器和发送器是双缓冲的，每一个都有它单独的使能和中断标志位。两者可以单独工作，或者在全双工方式下同时工作。SCI 使用奇偶校验、超时、帧出错监测确保数据的准确传输。SCI 有一个 16 位的波特率选择寄存器，在 100MHz 的晶振下，外围设备低速时钟为 25MHz，选择 19200bps 的波特率。

F2812 的 SCI 通信接口的主要特点有：

(1) 两个外部引脚 SCITXD 为 SCI 数据发送引脚；SCIRXD 为 SCI 数据接收引脚。在 F2812 上有两路可配置的 SCI 口，分别为 GPIOG5 接受、GPIOG4 发送和 GPIOF5 接收、GPIOF4 发送，他们都是功能复用 I/O 口。将 GPIO 设置为特殊功能口时，接口作为 SCI 通信接口；设置成普通口时，接口将作为通用 I/O 口^[38]。

(2) 可编程配置为多达 64K 不同的通信速率。

(3) 数据格式中(NRZ 格式)有一位起始位，可编程 1-8bit 的数据字长度，可选择奇偶校验或无奇偶校验位模式，另有 1-2 位停止位。

(4) 半双工或者全双工通信模式。

(5) 双缓冲接受和发送功能，发送和接受可以采用中断或查询的方式进行，具有独立的发送和接受中断使能位(除 BRKDT)。

(6) 13 个 SCI 模块控制寄存器位于控制寄存器的结构体里，控制寄存器的结构体的初始地址为 7050h。

(7) 拥有增强功能：自动波特率检测，16 级 FIFO。

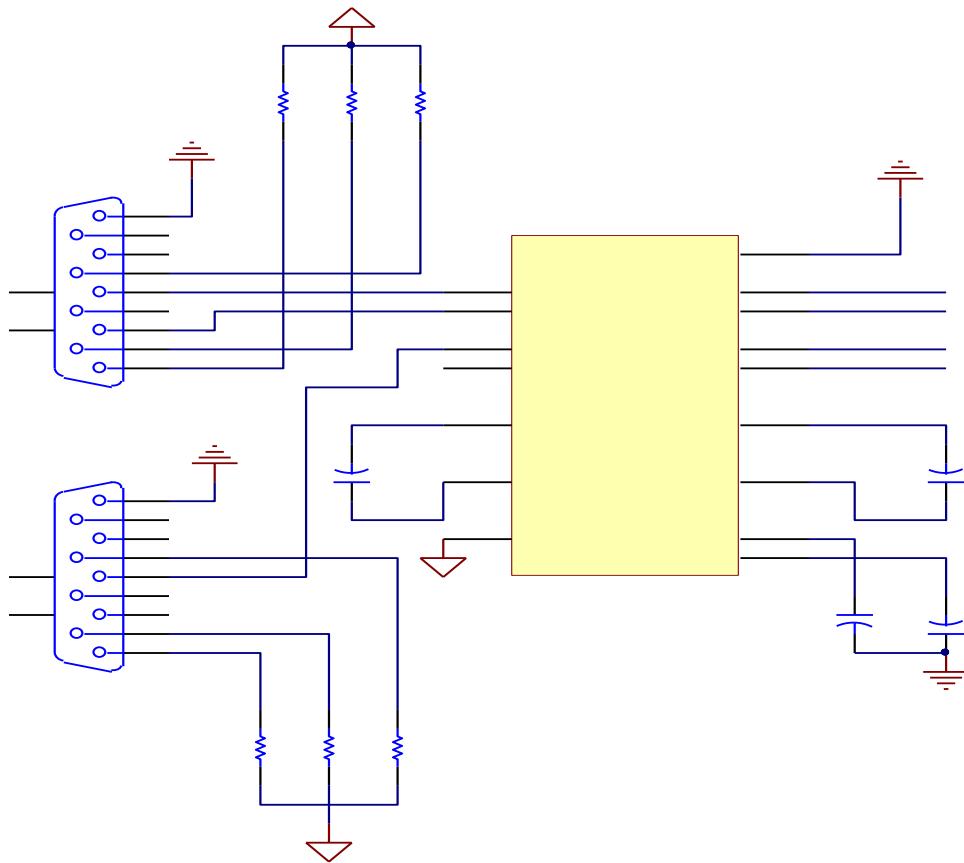


图 3.17 TMS320F2812 与 MAX232 接口电路图

图 3.17 是 TMS320F2812 的串行通信接口电路。该电路采用了符合 RS-232 标准的驱动芯片 MAX232 进行串行通信。MAX232 芯片功耗低，集成度高，+5V 供电，具有两个接收和发送通道。TMS320F2812 的 SCI 初始化包括以下几个部分：SCI 引脚配置为通用 I/O；时钟模式的选定；波特率选择；发送接收数据长度选择；内部的时钟使能。所有设置都是通过 SCI 控制寄存器实现的^[39]。

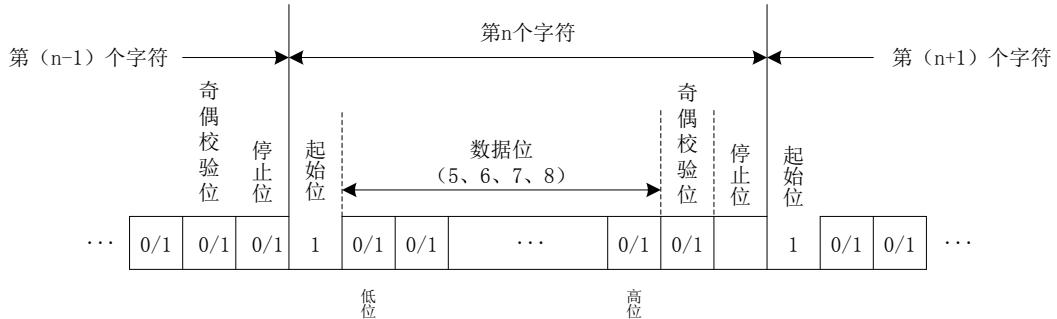
3.5.3 RS-232C

RS-232C 是目前使用最广泛的串行通信接口标准。RS-232C 是电子工业协会 EIA (美国电子工业协会) 在 1962 年公布的，并在 1969 年修订的 RS-232C 标准。该标准的目的是定义数据终端设备 (DTE) 和数据通信设备 (DCE) 之间接口的电气特性。RS-232C 定义了数据终端设备 (DTE) 与数据通信设备 (DCE) 之间的物理接口标准^[40]。

RS-232C 采用串行方式传送数据，一帧的数据格式如图 3.18 所示。

在帧格式中，一个字符由 4 个部分组成：起始位 (1)、数据位 (5-8)、奇偶

校验位 (1) 和停止位 (0)。RS-232C 传送的波特率可为: 19200、9600、4800、2400、1200、600、300、150、110、75、50。



RS-232C 采用负逻辑, 逻辑“1”为-5V~-15V, 逻辑“0”为+5V~+15V。

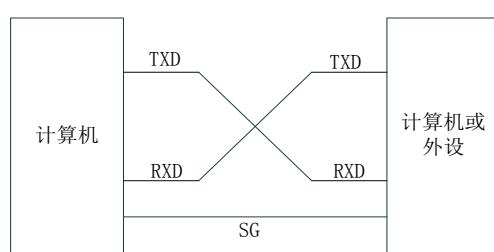
RS-232C 串行接口适用于:

- (1) 设备之间的通信距离不大于 15m。
- (2) 传送的波特率最大为 20kb/s。

表 3.2 9 针 RS-232C 引脚定义

信号线	连接器引脚
信号线 SG (共地)	7
保护地 FG	1
发送数据 TXD (输出)	2
接收数据 RXD (输入)	3
请求发送 RTS (输出)	4
清除发送 CTS (输入)	5
数据装置准备好 DSR (输入)	6
数据终端准备好 DTR (输出)	9
载波检测 DCD (输入)	8

RS-232C 共有 25 条线, 采用 DB-25 型 25 针的连接器, 它的每根引针都按规定连接 RS-232C 所用的信号线, 把数据终端与数据设备连接起来。目前已经很少使用 25 针 D 型连接器了, 一般 RS-232C 都使用 9 针 D 型连接器^[41]。9 针连接器的引脚定义见表 3.2。对于具有 RS-232C 串行口的计算机和数据终端设备来说, 仅用发送数据 TXD、接收数据 RXD 和信号地 SG 三根线即可实现全双工串行通信, 其连接方法如图 3.19 所示^[42]。



3.6 系统的防雷措施

由于雷电是高压大电流的瞬间放电过程,它必然在雷击处产生高电压和强电磁干扰,因此,雷电流自动监测系统必须具有极强的安全防护措施和抗干扰能力。安全防护可能有强电防护和弱电防护两个方面:强电防护首先是对雷击时可能在避雷器接地线上产生的瞬态高电压的防护,为此我们对套在接地线上的罗氏线圈采用了高绝缘强度的防护措施。其次,雷击时也可能在电源系统产生过电压,为此我们引入了特殊设计的原副边之间具有高绝缘强度的隔离变压器及其 UPS 电源对该系统的采样电路以及计算机供电。弱电防护是指确保即使在大雷电流时由罗氏线圈输入采样电路的电压信号不超过某安全阈值^[43]。为了抗干扰,我们为紧挨干扰源的罗氏线圈设计了特殊的屏蔽铁壳,它允许被测电流的磁通进入线圈,但在很大程度上抑制了其他干扰电磁场通过线圈引入测量回路。同时,信号传输电缆采用双层屏蔽,并在其末端加上了光耦隔离然后送去数模转换。采样电路和计算机也是置于一个屏蔽铁壳中,因此可以认为它们和外界具有较好的电磁隔离。

3.6.1 防雷保护区

现代防雷技术的理论基础在于:闪电是电流源,防雷的基本途径就是要提供一条雷电流(包括雷电电磁脉冲辐射)对地泄放的合理的阻抗路径,而不能让其随机地选择放电通道,简言之就是要控制雷电能量的泄放与转换。德国专家西曼斯基在《过电压保护理论与实践》中提出了现代防雷保护的三道防线:

外部保护:将绝大部分雷电流直接引入大地泄散;

内部保护:阻塞沿电源线或数据线、信号线侵入的雷电波危害设备;

过电压保护:限制被保护设备上的雷电过电压幅值^[47]。

这三道防线相互配合,各尽其职,缺一不可。

现代防雷技术是一项系统工程,必须贯彻整体防护思想,综合运用分流(Dividing)、均压(等电位)(Bonding)、屏蔽(Shielding)、接地(Grounding)和钳位保护(S-limiting)等各项技术,构成一个完整的防护体系,才能取得明显的效果。

根据 GB 50057-94 和 IEC 61312-1 等标准,从 EMC(电磁兼容)的观点来看,一个欲保护的区域(建筑物)由外到内可分为以下几级保护区:

(1)LPZA 区:本区内的各物体都可能遭到直接雷击和传导全部雷电流,本区内的电磁场强度没有衰减。

(2)LPZB 区:本区内的各物体不可能遭到大于所选滚球半径对应的雷电流直接雷击,但本区内的电磁场强度没有衰减。

(3)LPZ1 区:本区内的各物体不可能遭到雷击,流经各导体的电流比 LPZB 区的更小,本区内的电磁场强度可能衰减,这取决于屏蔽措施。

(4)LPZ_{n+1} (n=1,2,3……) 后续的防雷区：当需要进一步减小流入的电流和电磁场强度时，应增设后续防雷区，并按照需要保护的对象所要求的环境区选择后续防雷区的要求条件。

对于建筑物防雷保护设计而言，通过对建筑物外部和内部两个方面对雷电危害进行有效防护，来构成建筑物及其内部设施的雷电防护系统^[44]。

3.6.2 接闪器

接闪器是用来接受直接雷击的金属物体。接闪器分为避雷针、避雷线、避雷带和避雷网几种，接闪的金属杆称为避雷针，主要用于保护露天变配电设备及建筑物；接闪的金属线称避雷线或架空地线，主要用于保护输电线路；接闪的金属带、金属网分别称避雷带、避雷网，主要用于保护建筑物。它们都是利用其高出被保护物的突出地位，把雷电引向自身，然后通过引下线和接地装置把雷电泄入大地，使被保护的线路、设备、建筑物免受雷击。

避雷针是最早出现的接闪器，也是目前世界上公认的最成熟的防直击雷装置。避雷针的功能实质是引雷作用。当雷电先导临近地面时，它能使雷电场畸变，改变雷云放电的通道，吸引到避雷针本身，然后经与避雷针相连的引下线和接地装置将雷电流泄放到大地中去，使被保护物免受直接雷击。避雷针的保护范围，以其能防护直击雷的空间来表示，按国家标准 GB50057-2000 《建筑物防雷设计规范》，采用“滚球法”来确定^[45]。

对避雷针接闪原理的认识经历了一个发展过程，现在的滚球法理论比较全面地解释了接闪器吸引雷电的各种现象，被国内外标准所采纳。滚球法理论认为：半径为 R 的球与接闪器和地面相切绕接闪器滚动一周所形成的阴影区域即为接闪器的保护范围。在保护范围内并不是没有雷击，而是雷击能量较小。滚球半径越小，进入保护范围的雷击能量也越小，也就是说接闪器的防雷效果越好。接闪器并非越高越好，超过 60m 的接闪器在技术上是没有多大意义的。“滚球法”，就是选择一个半径为 h_r (滚球半径) 的滚球，沿需要防护直击雷的部分滚动，如果球体只触及接闪器或接闪器和地面，而不触及需要保护的部位时，则该部位就在这个接闪器的保护范围之类。滚球半径是按建筑物防雷类别确定的，见表 3.3。

表 3.3 各类防雷建筑物的滚球半径和避雷网格尺寸

建筑物防雷类别	滚球半径 h_r (m)	避雷网格尺寸
第一类防雷建筑物	30	$\leq 5 \times 5$ 或 $\leq 6 \times 4$
第二类防雷建筑物	45	$\leq 10 \times 10$ 或 $\leq 12 \times 8$
第三类防雷建筑物	60	$\leq 20 \times 20$ 或 24×16

在雷云对地放电过程中，下行先导在到达由雷击距所限界定的定向高度范围之前，其发展路径是随机的，直到下行先导头部达到地面上某物体的雷击距范围时，它才会定向击向该物体，如图 3.20 所示。

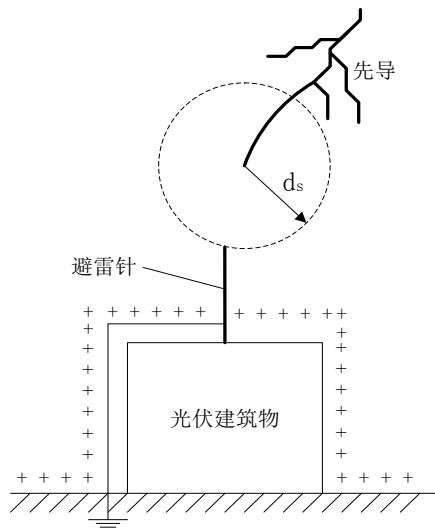


图 3.20 雷击距范围

当先导进入光伏建筑物避雷针的雷击距范围时，雷电就会向避雷针顶端发展，避雷针顶端就成为雷击点。下行先导的发展是具有随机性和定向性的，以此雷击过程为基础来确定光伏建筑物上的雷击点，滚球法就是基于此产生的。滚球法是将雷击地面或建筑物的过程，等效为以雷击距为半径的球体从天而降，随机的靠近地面或地面上的建筑物，该球体最先接触而且是处于地电位的点就是最可能遭受雷击的点。回击时雷电流幅值的大小决定了滚球半径的大小，因为雷电流的幅值是随机的，当雷电流幅值在变化时，滚球的半径也会变化^[46]。应当先选定一个和一定雷电流幅值对应的滚球半径 d_s ，滚球半径的选择是依据建筑物防雷设计规范推荐的数值，然后随机地将半径为 d_s 的滚球从天空抛向地面光伏建筑物，滚球与光伏建筑物屋面接闪器和地面有接触的点，如图 3.21 中所示的 A 点和 C 点，即为可能的雷击点。

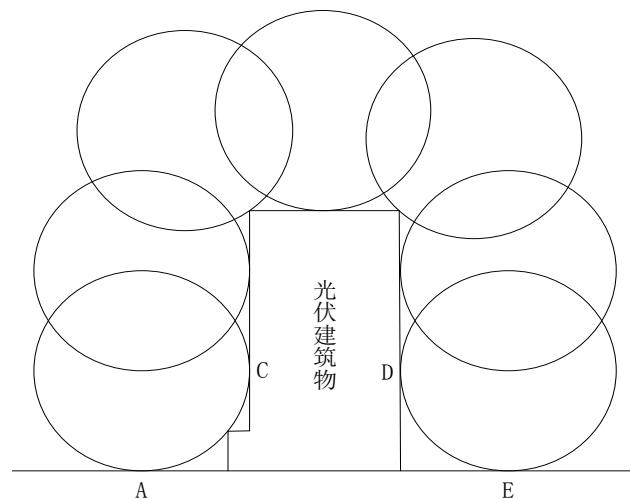


图 3.21 滚球在光伏建筑物面上的连续滚动

雷云放电的过程中，下行先导到达雷击距界定的范围之前，它的发展路径是

随机的，此时滚球就可能会从不同方向随机接触地面和光伏建筑物。所以，要确定好光伏建筑物上可能的各个雷击点，必须从上空从不同的方向不断的投掷滚球，并统计滚球接触过的一些点。这种方法可以等效于滚球是沿光伏建筑物的屋面不断地滚过建筑物的整体，如图 3.21 所示。滚球能够接触的点就是建筑物上可能遭受雷击的地方，滚球不能接触的地方，就是防雷装置可以保护的区域，也就是保护区^[47]。

在图 3.21 中，曲线 AC 和 DE 以下的区域空间就是保护区，光伏建筑物的接闪器能保护该区域。

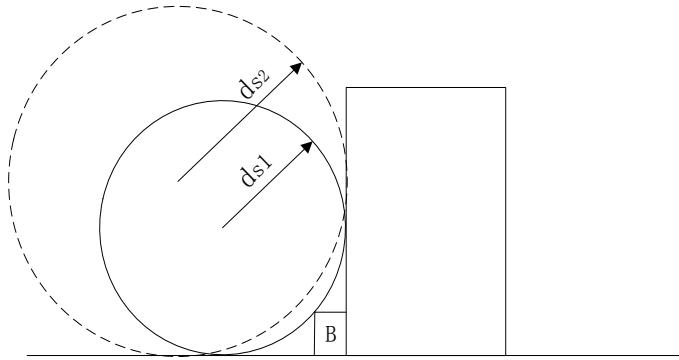


图 3.22 保护区随滚球半径的变化

通常强雷的雷电流幅值比较大，滚球半径 d_{S2} 也比较大，如图 3.22 所示，相应的保护区就大；弱雷的雷电流幅值比较小，滚球半径就比较小，保护区也小。例如在图 3.22 中，当滚球半径由 d_{S2} 减小到 d_{S1} 时，相应的保护区就会缩小，滚球半径为 d_{S2} 时的受保护点 B 就会和半径为 d_{S1} 的滚球接触，这样就成了雷击点。

光伏建筑物的空间受雷曲面也可以通过滚球法确定，如图 3.23 所示。将滚球沿光伏建筑物屋面和突出来的相关接闪器滚遍，滚球的球心经过的轨迹就构成了空间的受雷曲面^[48]。

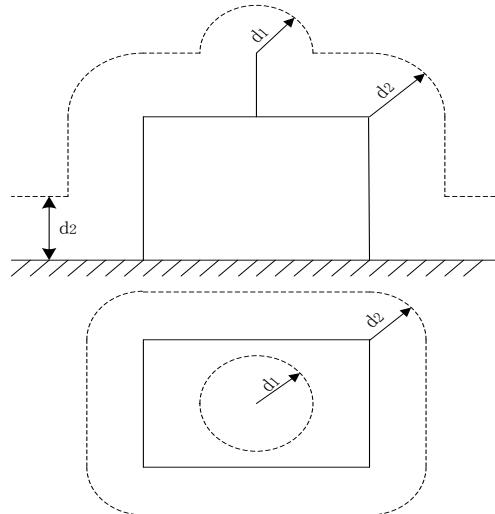


图 3.23 光伏建筑物的空间受雷曲面

滚球法一个明显的优点就是可以很方便地确定形状不规则的建筑物上容易遭受雷击的部位。

3.6.3 避雷器

避雷针仅能针对直击雷进行防护。而感应雷的产生及危害伴随闪电发生的前后，且危害途径较多。闪电发生前，雷雨云内聚集大量的电荷，由于电磁感应使其影响范围内（一般为闪电发生处2公里范围内）的电源线、信号线等所有导体感应出很高的电动势，并侵入到与其相连的电器设备内，由于电器设备自身具有各种接地，就造成了设备的局部低电位，并与侵入的高电位形成电位差，当电位差达到一定强度和距离要求时就会产生放电现象（电击穿），并产生电火花，造成设备元件、接口的损坏。

而在闪电发生后，由于云层内部的电荷经中和后减少，被感应出的电荷束缚能力降低或消失，造成感应电荷向线路两端自由移动，形成冲击电流（电涌/浪涌），当冲击电流超出电脑等网络设备耐压值时，将直接造成设备损坏。

避雷器的作用就是在最短的时间（纳秒级）内将被保护线路接入等电位系统中，使设备各端口等电位，同时将电路上因雷击而产生的大量脉冲能量短路泄放到大地，故避雷器的电流泄放能力大小将直接影响其对电路的保护能力。

安装避雷器是目前最为有效的防雷措施，可有效防止雷电流侵入设备，造成损坏。避雷器的正常工作需要与良好的接地系统相连，在一般情况下，防雷器内部为高阻抗状态，视为与接地断路，当雷电流出现时，避雷器在极短时间内（纳秒级）开始动作，线路与接地系统导通，将线路上的雷电流经避雷器引入接地系统，并泄放至大地，且避雷器对线路上的电压具有限制作用，当雷电流减弱至防雷器的限制电压（保护水平）下时，避雷器自动回复至高阻抗，断开与接地的连接。

避雷器是用来防止雷电产生的过电压沿线路侵入变配电所或其他建筑物内，以免危及被保护设备的绝缘。避雷器的类型有阀型避雷器、排气式避雷器、金属氧化物避雷器、保护间隙^[49]。

（1）阀型避雷器

阀型避雷器由火花间隙和阀片组成，装在密封的瓷套管内。火花间隙是用铜片冲制而成，每对为一个间隙，中间用云母片（垫圈式）隔开，其厚度为0.5~1mm。在正常工作电压下，火花间隙不会被击穿从而隔断工频电流，但在雷电过电压时，火花间隙被击穿放电。阀片是用碳化硅制成的，具有非线性特征。在正常工作电压下，阀片电阻值较高，起到绝缘作用，而在雷电过电压下电阻值较小。当火花间隙击穿后，阀片能使雷电流泄放到大地中去。而当雷电压消失后，阀片又呈现较大电阻，使火花间隙恢复绝缘，切断工频续流，保证线路恢复正常运行。必须注意：雷电流流过阀片时要形成电压降（称为残压），加在被保护电力设备上，残压不能超过设备绝缘允许的耐压值，否则会使设备绝缘击穿。

(2) 氧化锌避雷器

氧化锌避雷器是目前最先进的过电压保护设备。在结构上由基本元件和绝缘底座构成，基本元件内部由氧化锌电阻片串联而成。电阻片的形状有圆饼形状，也有环状。其工作原理与阀型避雷器基本相似，由于氧化锌非线性电阻片具有极高的电阻而呈绝缘状态，有十分优良的非线性特性。在正常工作电压下，仅有几百微安的电流通过，因而无需采用串联的放电间隙，使其结构先进合理。

氧化锌避雷器主要有普通型（基本型）、有机外套氧化锌避雷器、整体式合成绝缘氧化锌避雷器、压敏电阻氧化锌避雷器 4 种类型。

有机外套氧化锌避雷器有无间隙和有间隙两种，由于这种避雷器具有保护特性好、通流能力强，且体积小、重量轻、不易破损、密封性好、耐污能力强等优点，前者广泛应用于变压器、电机、开关、母线等电力设备的防雷，后者主要用于 6~10kV 中性点非直接接地配电系统的变压器、电缆头等交流配电设备的防雷。

整体式合成绝缘氧化锌避雷器是整体模压式无间隙避雷器，具有防爆防污、耐磨抗振能力强、体积小、重量轻和可采用悬挂方式等特点，用于 3~10kV 电力系统电气设备的防雷。

MYD 系列氧化锌压敏电阻避雷器是一种新型半导体陶瓷产品，其特点是通流容量大、非线性系数高、残压低，漏电流小、无续流、响应时间快。可应用于几伏到几万伏交直流电压的电气设备的防雷、操作过电压，对各种过电压具有良好的抑制作用。

(3) 保护间隙

与被保护物绝缘并联的空气火花间隙叫保护间隙。按结构形式可分为棒形、球形和角形 3 种。目前 3~35kV 线路广泛应用的是角形间隙。角形间隙由两根直径 10~12mm 的镀锌圆钢弯成羊角形电极并固定在瓷瓶上。正常情况下，间隙对地是绝缘的。当线路遭到雷击时，角形间隙被击穿，雷电流泄入大地。角形间隙击穿时会产生电弧，因空气受热上升，电弧转移到间隙上方，拉长而熄灭，使线路绝缘子或其他电气设备的绝缘不致发生闪络，从而起到保护作用。因主间隙暴露在空气中，容易被外物（如鸟、鼠、虫、树枝）短接，所以对本身没有辅助间隙的保护间隙，一般在其接地引线中串联一个辅助间隙，这样，即使主间隙被外物短接，也不致造成接地或短路。

保护间隙灭弧能力较小，雷击后，保护间隙很可能切不断工频续流而造成接地短路故障，引起线路开关跳闸或熔断器熔断，造成停电，所以只适用于无重要负荷的线路上。在装有保护间隙的线路上，一般要求装设自动重合闸装置或自复式熔断器，以提高供电可靠性^[50]。

3.7 接地

接地就是把电气系统、电路或设备与大地连接，或者与范围广泛且能用来代

替大地的等效金属导体连接（例如电气设备金属底座等）。其目的在于确定与之相连接的导体电位并使之大致维持在大地电位或维持在代替大地的等效金属导体的电位，以便传导电流来往于大地或等效金属导体之间。接地是一种有目的的永久或临时性的导电连接，通过这种连接而使电路或设备变成为接地的。

光伏发电系统中接地通常指的是接大地即将电力系统或电气设备的某一金属部分经金属接地线连接到接地电极上。接地的主要目的是防止人身触电伤亡、保证电力系统正常运行、保护输电线路，预防火灾、防止雷击损坏设备和防止静电放电的危害等。接地的作用主要是利用接地极把雷电流快速自如地泄放进大地土壤中，以达到保护人身安全和电气设备安全的目的^[51]。光伏系统的接地包括以下方面。

（1）防雷接地：包括避雷针、避雷带以及低压避雷器、外线出线杆上的瓷瓶铁脚还有连接架空线路的电缆金属外皮。

（2）工作接地：逆变器、蓄电池的中性点、电压互感器和电流互感器的二次线圈。

（3）保护接地：光伏电池组件机架、控制器、逆变器、以配电屏外壳、蓄电池支架、电缆外皮、穿线金属管道的外皮。

（4）进出机房所在楼房保护界面的金属管线都进行等电位处理，等电位处理也可称共地处理，即防雷地、工作地、保护地均进行等电位连接，消除各点之间的电位差。

（5）机房设置均压环，以用于电磁屏蔽和等电位处理，具体作法：用 $3 \times 30\text{mm}$ 的扁铜沿机房内侧一周，并与通过 PE 线与地网可靠连接，地网连接带用 $4 \times 40\text{mm}$ 的热镀锌扁铁。机房均应设置均压环，并做等电位连接。

（6）机房内各金属门窗、金属柜体、机架、设备金属外壳、防静电地板均就近接地、数据线路的金属屏蔽层、设备工作地均与防雷地连接。

3.7.1 接地电阻

国家标准 GB 50057-94 中第四章第三节具体而详尽地描述了合格的接地装置，第三章则规定了各类防雷建筑物所限定的接地电阻值，有的必须低于 5Ω ，有的必须低于 10Ω ，等等。定性地说，电流通过接地极向周围大地无穷远处流散时大地土壤所呈现的总电阻，称为接地电阻。接地电阻的定量定义是：在某个电极上流入接地电流 I ，而接地极的电位比周围大地无穷远处高出 U 时，则接地极电位 U 对接地电流 I 的比值 U/I 称为接地电阻。这个定义必须附加下述两个条件：

（1）要使接地电流流向接地极，必须做出闭合回路，当然必须向大地打入另一个接地极，然后将电源接入两个电极之间即可产生接地电流。这另外一个电极叫做辅助电极，要设置在离主接地足够远的地方（理论上在无穷远处）。这样做可以忽略给主电极带来的影响。

(2) 接地极的电位上升必须以大地的无穷远点为基准(零电位)。这里所说的无限远点是指即使有接地电流, 电位也不变动的地点, 即意味着与通电前的状态没有变化的地点。将这个地点作为电位的基准点(零电位), 因此, 可以从电位上升值及其接地电流求出真正的接地电阻。

光伏发电系统对接地电阻值的要求较严格, 因此要实测数据, 建议采用复合接地体, 接地极的根数以满足实测接地电阻为准。光伏电站的接地接零的要求: 电气设备的接地电阻 $R_g \leq 4$ 欧姆, 满足屏蔽接地和工作接地的要求; 在中性点直接接地的系统中, 要重复接地, $R_g \leq 10$ 欧姆; 防雷接地应该独立设置, 要求 $R_g \leq 30$ 欧姆, 且和主接地装置在地下的距离保持在 3m 以上。如下图 3.24 所示为单根垂直接地体。

当 $l >> d$ 时, 接地电阻的计算公式为: $R_g = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}$

式中: R_g —— 使用接地棒以后的工频接地电阻 (Ω);

ρ —— 相应的土壤电阻率 ($\Omega \cdot m$);

l —— 接地棒伸入地下的长度 (m);

d —— 接地棒的截面直径 (m)。

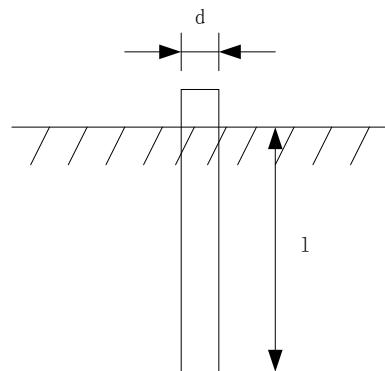


图 3.24 垂直接地体

在实际的应用中, 单个接地体电阻是不能达到要求的, 必须埋设多跟接地体, 并用金属导线连接起来, 减少接地电阻。但是接地体之间有电场相互的屏蔽, 这就阻碍了电流通过接地体向外的泄散, 总的接地电阻 R_g 就会大于单独接地体并联的电阻值^[52]。

3.7.2 接地极

接地极就是埋入大地中并与大地紧密接触的金属导体, 它是雷电流进入大地的通路。接地极的主要作用如下:

(1) 保持与大地的良好接触, 以使与其相连接的电气设备的非载流金属部

分保持大地电位。

(2) 为雷电流、线路或设备接地故障电流提供低电阻（或低阻抗）散流通道，将大量电流迅速地消散到大地中。

(3) 通过接地极把光伏电站的电气设备外壳上集聚的泄漏电荷或静电电荷引导入大地中。

(4) 在故障状态下，若供电系统的中线（已接地）连接到配电箱上时，其作用就是把故障电流引导到过电流保护装置上。若过电流保护装置能启动，就可以切断故障电源。

接地极利用电镀技术，使镀锌（铜）与钢芯完全分子结合，只有锌（铜）与钢完全分子结合才有效，如两者结合不严密，在通电的情况下会发生原电池反应，阳极金属铁发生氧化反应而变成铁离子流失，反而加快钢芯受蚀速度。接地极与接地连线应采用热熔焊剂焊接，使接地装置完全处在锌（铜）的保护之下，成为真正的免维护接地装置^[53]。

接地极可以采用深埋处理，深埋接地方法在国外早已得到使用，并在实际应用中取得了良好的效果。我国近年来也开始采用这种方法并在逐步推广，深埋接地可获得恒定的低电阻。深埋接地有以下几个优点：

①不受地方、环境的限制。在建筑物拥挤、设地网区域狭窄的场合，采用传统的方法很难找到埋设接地极的地方，而且安全距离又无法得到保证。采取深埋措施不但可以起到降阻作用，而且可以大大减小跨步电压。

②深埋接地体受季节变化影响小，可获得稳定的接地电阻。

③深埋接地体可以获得最佳土壤电阻。土壤电阻随着深度的增加而大大减小，尤其是含沙土壤（含沙土壤一般都在 3m 以内的表面层）。在地层深处的土壤电阻系数较低。接地体深埋于地下 10m 以下，土壤电阻一般为 10Ω ， $15m$ 以下时土壤电阻一般为 5Ω （超过 $15m$ 时土壤电阻更加显著降低）^[54]。

4 雷电监控系统软件设计

4.1 集成开发环境 CCS

DSP 芯片开发工具由一套完整的硬件开发工具和软件开发工具组成。DSP 开发工具包含代码的生产工具与调试工具。在代码的生产工具中，先将汇编语言、C 语言或者相混合的语言编写成 DSP 源代码程序，再将源代码程序编译、汇编、链接成可执行的 DSP 代码。在 DSP 代码生产工具中，编译器、汇编器和链接器缺一不可。而在代码调试工具中，可对目标系统和 DSP 代码进行调试，以完成设计的目标。TMS320 系列的 DSP 芯片包含的系统集成与调试工具有：初学者工具 (DSK)、C 语言源代码的调试器、评估模块 (EVM)、汇编语言源代码的调试器、软件开发系统 (SWDS)、软件仿真器和仿真器 XDS 等。

DSP 软件的设计和调试是在 CCS3.3 (Code Composer Studio) 上实现的。CCS 是一个完整的 DSP 集成开发环境，也是目前最优秀的 DSP 开发软件之一。CCS 提供了配置、建立、调试、跟踪和分析程序的工具，它便于实时、嵌入式信号处理程序的编制和测试，它能够加速开发进程，提高工作效率。CCS 一般工作在两种模式下：软件仿真器和与硬件开发板相结合的硬件仿真。前者可不使用 DSP 芯片，在 PC 机上直接模拟 DSP 指令集以及工作机制，主要运用于前期算法实现和调试工作。后者则必须在 DSP 芯片上实时运行，主要运用于在线的编制和调试程序工作。对运算能力的要求不是特别高时，可使用 C 语言来开发 DSP 程序，不仅能加快 DSP 的开发速度，而且能加强开发后 DSP 程序的可修改性、可移植性和可读性。采用 C 编译器的优化功能可以增加 C 代码的效率。为了使程序具有良好的可读性和可移植性又不失效率本系统采取 C 和汇编语言相结合的编程方法^[55]。

CCS3.3 提供了基本的代码生成工具，它们具有一系列的调试、分析能力。CCS 支持如下所示的开发周期的所有阶段。图 4.1 为 CCS 的开发流程。

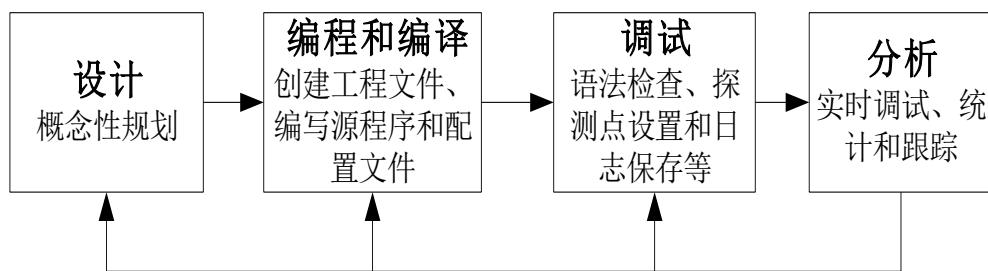


图 4.1 CCS 的开发流程

CCS 集成开发环境支持编辑、编译、汇编、链接和调试 DSP 程序的整个开发过程，它还允许编辑 C 代码和汇编源代码，还可以在 C 代码之后显示与之对应的汇编指令。只需要在菜单 View 中选择 Mix Source/Asm 选项，即可看到 C 之后跟着的汇编语句。CCS 使用工程 (Project) 来管理应用程序的设计文档，工程中包

含有源代码、目标文件、库文件、连接命令文件和头文件。在以往的开发工具中，编译、汇编和链接是各自独立的执行程序，开发设计人员需要熟悉每个程序的相关参数，且需要在 DOS 窗口下键入这些繁琐的命令，而在 CCS 集成开发环境下只需要修改这些参数即可。而且 CCS 能自动查找工程所需要的头文件，并将它加入到工程中。

CCS 提供了异常丰富的调试手段。在程序执行控制上，CCS 提供了 4 种单步执行方式。从数据流角度上，用户可以对内存单元和寄存器进行查看和编辑，载入/输出外部数据，设置探针等。一般的调试步骤如下：

- ① 调入构建好的可执行程序；
- ② 在程序段设置断点；
- ③ 执行程序停留在断点处，查看寄存器的值或内存单元的值，对中间数据进行在线（或输出）分析；
- ④ 反复这个过程直到程序完成预期的功能。

CCS 构成及接口见图 4.2。

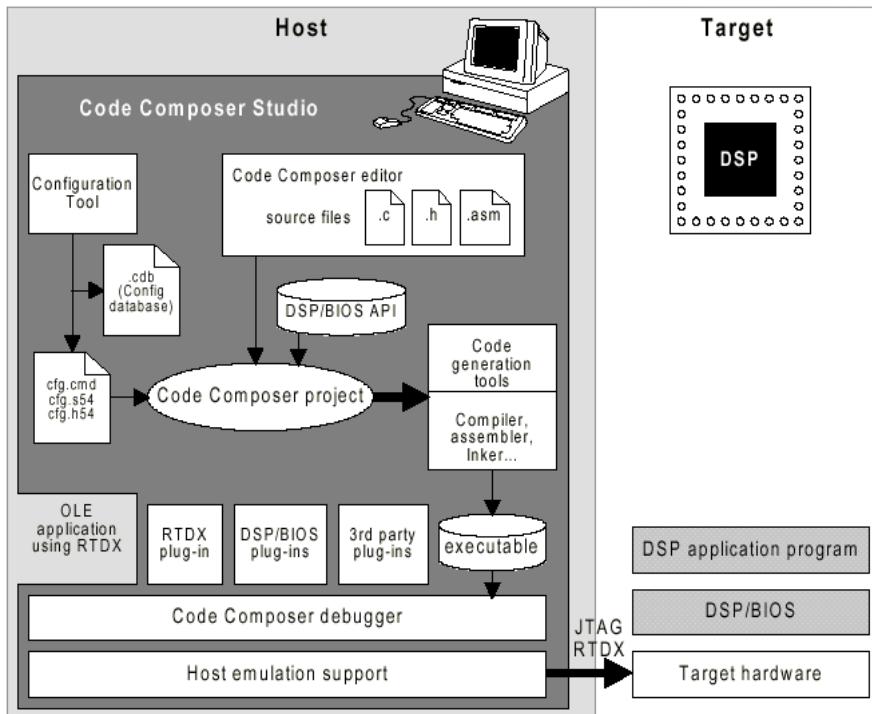


图 4.2 CCS 构成及接口

代码生成工具奠定了 CCS 所提供的开发环境的基础。图 4.3 给出了一个典型的软件开发流程，图中有阴影部分表示通常的 C 语言开发流程，而其他部分则是为了强化开发过程而设置的附加功能。CCS 内置的程序编辑器不但可以编辑汇编语言源程序，而且可以编辑 C 源程序，CCS 还设有交叉汇编功能，即程序窗口同时显示 C 语言代码及与之关联的反汇编代码，这样可以很清楚地了解 C 语言的汇编效率。

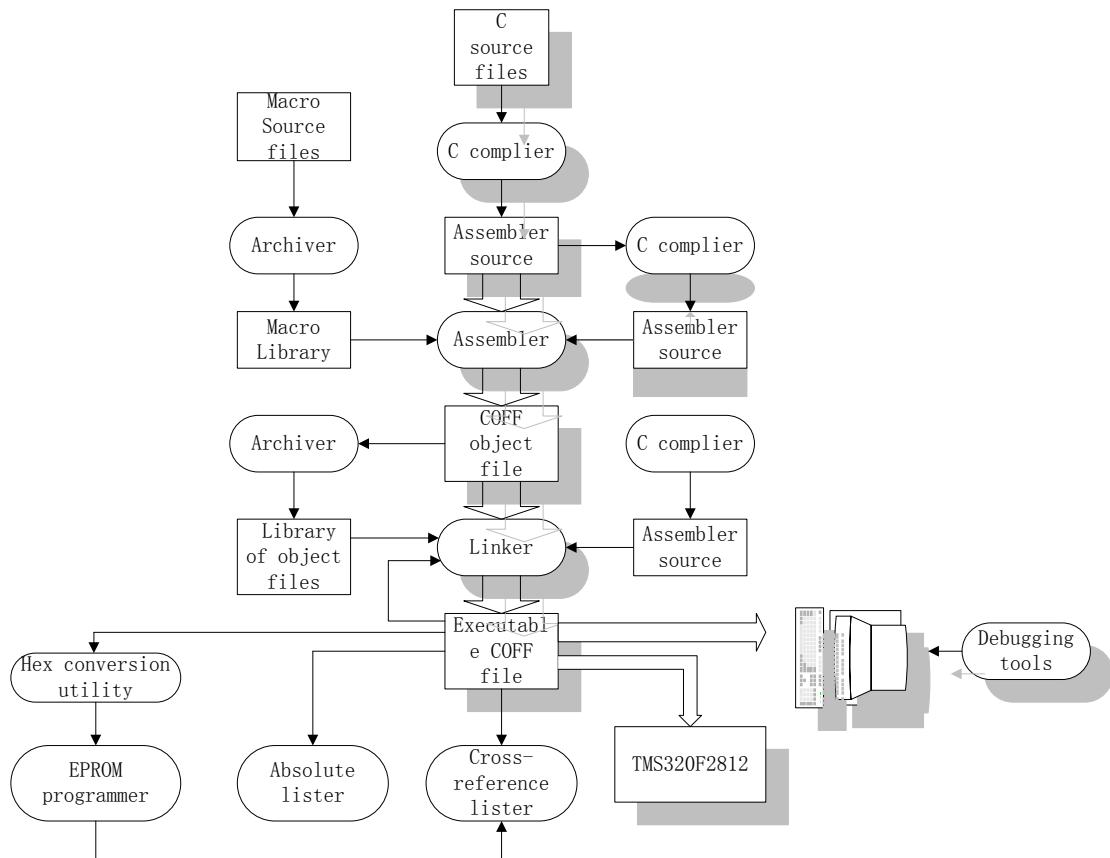


图 4.3 软件开发流程图

图 4.3 中主要的工具有：

- (1) 归档器 (archiver);
 - (2) 助记符到代数汇编语言转换公用程序 (mnemonic_to_algebraic assembly translator utility);
 - (3) 库创建应用程序 (library build utility);
 - (4) 运行支持库 (run time support libraries);
 - (5) 十六进制转换器 (hex conversion utility);
 - (6) 交叉引用列表器 (cross reference lister);
 - (7) 绝对列表器 (absolute lister)。

4.2 系统总体软件设计

整个监控系统把采集到的直击雷和非直击雷的雷电流参数，通过计算和软件分析比较，然后设置 DSP 核心控制部分的参数，从而得到比较精确的雷电流参数值。系统主程序设计框图如图 4.4 所示。

通过下面的流程图可以看出，可以将不同功能模块加入到主程序中，在通信正常的情况下，对数据进行实时采集，然后对采集到的数据进行处理和显示。罗氏线圈输出的雷电流信号送给采样电路的同时也送给触发电路，该触发电路使得采样电路开始采集和 PC 机读取数据^[56]。

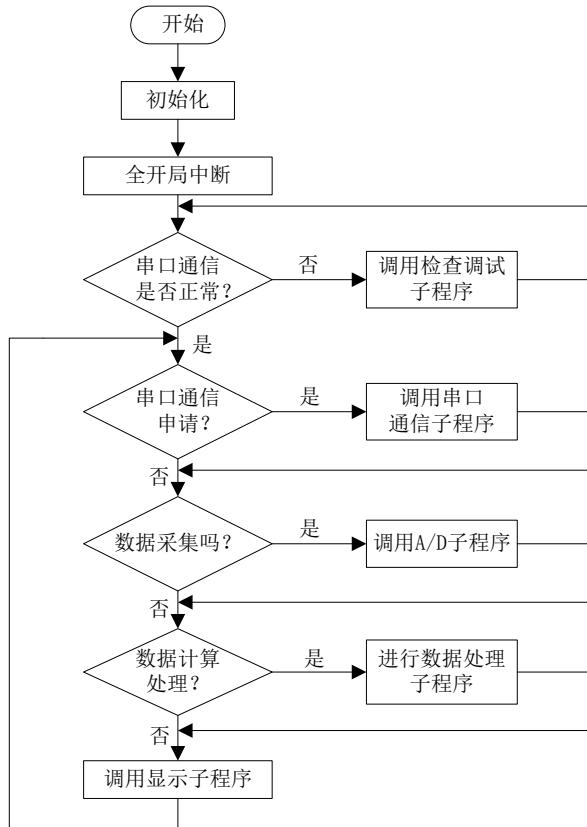


图 4.4 系统主程序流程图

监控系统的数据采集和计算处理任务在各个相应的子程序中完成，数据采集处理后根据扩展的功能对数据进行监测和控制。在 CCS 编译环境下运用汇编和 C 语言混合编程完成基于 F2812 DSP 的数据采集处理程序的开发。

4.3 串口通信模块

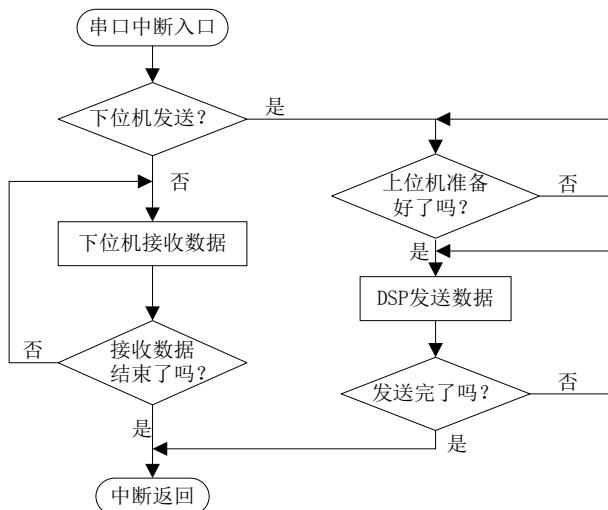


图 4.5 串口通信子程序

图 4.5 为串口通信程序流程图，TMS320F2812 的 SCI 初始化包括以下几大部分：SCI 引脚配置为通用 I/O；时钟模式的选定；波特率的选择；发送接收数据长度选择；内部的时钟使能。串口通信调试子程序流程图如图 4.6 所示。

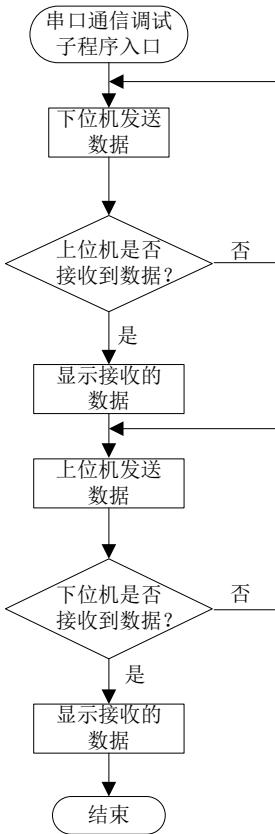


图 4.6 DSP 串口通信调试子程序

为了保证数据的完整, SCI 模块对接收到的数据进行间断检测 (break detection)、奇偶校验 (parity)、超限校验 (overrun) 以及帧的错误校验 (framing errors)。通过对 16 位的波特率寄存器进行编程, 可以配置不同的 SCI 通信速率。所有设置都是通过 SCI 控制寄存器实现的, 要完成 DSP 与上位机的通信, 需要对 DSP 中有关串行通信控制字和标志寄存器进行正确的设置^[57]。串口的初始化函数如下:

```

ScibRegs.SCIFFTX.all=0xE040; //允许接收、使能 FIFO, 没有 FIFO 中断,
清除 TXFIFINT

ScibRegs.SCIFFRX.all=0x2021; //使能 FIFO 接受, 清除 RXFFINT, 16 级 FIFO
ScibRegs.SCIFFCT.all=0x0000; //禁止波特率校验
ScibRegs.SCICCR.all=0x0007; //1 个停止位, 无校验, 字长 8 位
                                //空闲地址模式, 字长 8 位

ScibRegs.SCICCTL1.all=0x0003; //复位
ScibRegs.SCICCTL2.all=0x0003;
ScibRegs.SCIHBAUD=0x0001;
ScibRegs.scILBAUD=0x00E7; //设定波特率为 9600bps
ScibRegs.SCICCTL1.all=0x0023; //退出 RESET

```

4.4 数据采集 ADC 模块

F2812 的 ADC 模块是一个 12 位 16 通道的模数转换器，模拟电路的部分包括前端模拟多路复用器 (MUXs)、采样及保持电路 (S/H)、转换电路、稳压器电路以及其他的基础模拟电路部分。数字电路的部分包括模拟电路接口、可编程的排序器、转换结果缓冲寄存器、设备的外设总线接口，以及其他片内模块接口。ADC 模块有 16 个转换通道，可配置成两个独立的 8 通道转换模块，分别对应于事件管理器 A 和 B，也可以将两个 8 通道转换模块级联成 16 通道模块。在 F2812 中，用户使用自动排序模式可对同一个通道完成多次采样和转换，或者采用特殊采样算法，这样可以提高系统的采样和转换精度。

ADC 采样子程序流程图如图 4.7 所示。

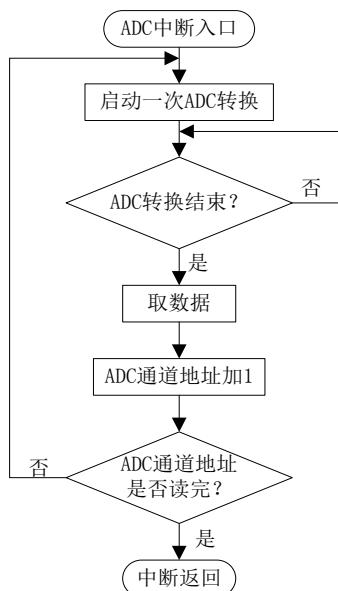


图 4.7 ADC 采样子程序流程图

系统采用 TMS320F2812 自身的 ADC 模块可方便的采集雷电流信号，省去了专用的 ADC 芯片，使系统的时序控制变得简单，从而降低了系统的复杂性，也节约了成本。采集完成后就可以通过 CCS 提供的图形工具来显示采集到的信号波形，并生成.dat 文件供 CCS 的 Demo 程序使用。数据采集的作用是实时采集雷电信号，并将其数字化后通过串行口传送到室内的数据终端，以便后期处理统计数据。数据采集可以根据主机命令采集雷电信号，在数据终端上可以直观的看到雷电流曲线。还可以根据主机命令向信道电路输出增益控制信号，这大大增强了系统的应变能力和测试的可靠性。更重要的是可以从两路磁场信号中扣除噪声，从而提高了设备的测试精度。

模数转换相对于计算机来说是一个缓慢的过程，利用中断的方式启动转换或者保存结果，这样在 CPU 忙于其他工作时可以少占用处理时间。在转换程序中考虑到处理过程如何与模数转换的时间匹配，根据实际需要选择了适当的触发转

换的手段，也能够及时的保存结果。

在主函数中，初始化系统控制寄存器、PLL 时钟、看门狗和时钟，初始化 PIE 控制寄存器，禁止所有的中断后再初始化 PIE 中断向量表，使用 ADC 中断。向 ADCTRL1.RESET 位写 1，复位整个 ADC 模块，在两个 ADC 时钟周期后，将间隙和参考电路上电，再将模拟电路上电。使能 PIE 寄存器中的 ADCINT，允许全局中断，允许 DEBUG 中断。

初始化 ADC 的函数如下：

```
AdcRegs.ADCMAXCONV.all=0x0001; //设置两路通道
AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV00=0x0; //转换通道 0
AdcRegs.ADCTRL2.bit.EVA_SOC_SEQl=1; //允许 EVA 通过触发信号启动
SEQl/SEQ
AdcRegs.ADCTRL2.bit.INT_ENA_SEQl=1; //由 INT SEQl 产生的中断请求
被使能
```

初始化 EVA 的函数如下：

```
EvaRegs.T1PR=0x31; //设置周期寄存器的值
EvaRegs.GPTCONA.bit.T1TOADC=1; //使能 EVA 中的 EVASOC
EvaRegs.T1CON.all=0x1042; //使能定时器 1 的比较(向上溢出模式)
```

配置完成后，等待中断的发生，在处理 AD 转换结果时，因为 ADC 的精度为 12 位，但是存储器是 16 位，数据在存储器中按照左对齐的方式存储，读取时首先将数据右移四位得到真正的转换结果。根据需要可灵活设置采样的频率(改变 T1PR 周期寄存器中的值)，数据采集可循环进行。

4.5 数据处理模块

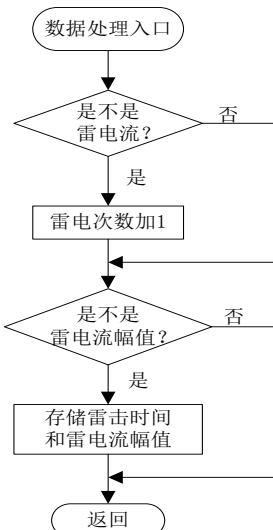


图 4.8 数据处理子程序流程图

图 4.8 为数据处理子程序流程图。对采集到的雷电流数据参数，判断是否为雷电流，如为雷电流，记录雷击次数。判断是不是雷电流幅值，如是雷电流幅值，

记录雷电流幅值，所记录的数据都存储起来，最后在 PC 机中显示出来。

在数据采集模块采集数据之后，就进入数据处理模块处理数据，以便今后对其进行分析、处理。在这个模块中生成的数据记录文件既存储了数据采集数据、又存储了数据采集配置信息，还有采集数据的系统时间，这样在以后的分析、处理时就很方便。

当一个雷击点产生时，雷电信号将向四面八方传播，分布在各个点的探测站也会收到这个信号，探测站的这个雷电数字信号由调制解调器通过微波通信通道传到中心站，中心站对信号进行位置分析计算后，存储在前置处理机中，同时也将这一信号通过微波或光纤发送至各远程显示终端站。终端站收到数据以后，在本地向一个二进制格式的雷电数据文件中不断添加数据，文件名是我们可以任意设置的，这样方便检索和数据备份，其它的功能都是以这些实时收到的数据文件为数据源，对其进行查询、分析、数据统计、数据重放等等，所以数据源的可靠性以及数据的完整性尤其重要。

4.6 显示模块

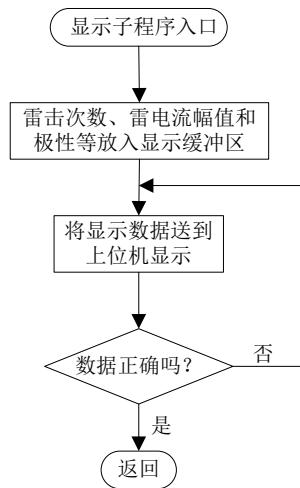


图 4.9 显示子程序流程图

对于系统的各个功能模块执行的数据信息，都要在上位机中显示出来。如图 4.9 为显示子程序流程图，显示模块主要是显示统计的雷击次数、雷电流幅值和极性、回击次数以及每次回击的参数信息。上位机中的显示能比较直观的观测各项数据信息，为整个监控系统的防雷工作提供依据。

在这一模块对采集的雷电数据进行分析和显示。处理的方法是乘以增益减偏置，得到其波形图，可以根据信号频率提取该频率的幅度值，以便进行辐射电磁场的其他参数计算。最后，在显示模块根据显示选择的不同在图形控件和数值显示控件来显示时间幅值电压波形图。

5 总结与展望

5.1 总结

本文以 TMS320F2812 作为核心芯片，搭建了光伏发电系统雷电监控系统的硬件，并在此硬件平台的基础上，进行了整个监控系统的软件设计。

在论文的开始部分，首先介绍了整个光伏行业的发展，并对光伏发电系统的防雷做了阐述，并了解了国内外在这方面的研究现状。然后对整个监控系统进行了分析，根据整个监控系统的具体需求，我们采用 TI 公司的 2000 系列 DSP 芯片 TMS320F2812 作为核心控制芯片。考虑到雷电是一个大电流(幅值最高可能达几百 kA)、微秒量级的瞬态放电过程，雷电的特点是放电电压高、电流幅值大、电流变化快、放电过程时间短、电流波形陡度大，基于雷电流以上特点使得雷电流参数采集比较困难。采用罗氏线圈作为电流传感器，而后对相应的采样电路、串口通信电路、外围接口电路进行了设计。

论文最后对于监控系统的防雷措施进行了描述，介绍了避雷针、避雷器的应用，最后介绍了 DSP 芯片软件系统的设计。整个系统达到监测雷电，并起到防雷避雷的作用，对光伏发电系统进行比较好的保护。

本监控系统的创新点就在于针对太阳能光伏并网发电系统，采样高效的 DSP 芯片内部的模数转换模块(ADC)进行数据的采集及 A/D 转换，转换后的数据预先存储到片外的 RAM 中，再经 DSP 进行前端的数字信号处理后，通过 USB 总线传给上位机，并在上位机上进行存储、显示和分析等。避雷方案进行综合改进，采用全面、有效的避雷设计方案，采取多级防护措施，对户内和户外发电设施分别进行有效地保护，确保太阳能光伏并网发电系统的正常工作。将避雷监控技术应用于太阳能光伏并网发电系统，通过对户外太阳电池方阵的直击雷防护与户内控制器和逆变器的非直接雷击(雷电感应和雷电侵入波)的防护，达到使太阳能光伏并网发电系统有效和安全运行的目的。

5.2 展望

目前提高光伏发电系统防雷技术水平需从两个方面开展工作，一是不断探讨和完善现代防雷理论，二是开发和研制新一代的防雷产品。对于现代避雷器，应同时具有以下技术性能：

- ①具有完全的防雷功能，即对雷电陡波和雷电幅值同样有限压保护作用。
- ②其防雷保护作用不会造成网络接地故障或线间短路故障，这是保证网络正常、安全运行的重要条件。
- ③动作特性应具有长期运行的稳定性，免受暂态过电压的危害。
- ④应具有连续雷电冲击保护能力。

⑤应有较小的外形尺寸，小型化和轻量化更便于安装。

⑥具有较高的技术性能指标和较低的损耗。

⑦应具有 20 年以上的使用寿命。

在太阳能光伏发电领域，防雷已经成为一个关键的课题，光伏发电的快速发展引发了对传统防雷技术的创新和发展，并推动各种防雷新产品的开发和研制。但是光伏发电系统的防雷仍在不断发展中，防雷技术中还有许多待探索的问题。目前雷云起电的机理还不清楚，雷电感应的定量研究也很薄弱，防雷产品也在发展中，一些防雷产品所声称的新效果需要以科学的态度在实践中进行检验，在理论上进一步发展和完善。由于雷电本身是小概率事件，需要通过长期大量的统计分析才能得到有益的结果，这需要理论研究、产品开发和工程实践各方的通力合作才能得以实现。

因太阳能光伏发电系统防雷技术在实际应用中存在诸多不足，故改善和完善传统的防雷技术势在必行，要求创新发展防雷技术，以满足现代光伏电站对防雷保护提出的更高要求。树立科学的雷电防护理念、坚持学习先进的雷电防护技术、不断完善现有的高电压实验和冲击大电流实验等检验体系，是光伏电站雷电防护技术提高和产品完善的有效手段。为使光伏电站的防雷能达到最佳防护效果，一般都不是单纯的使用一种防雷技术，而是多种技术进行系统整体防雷。除了各种防雷设施以外，同时在认真调查系统的地理、地质、土壤、气象、环境等条件和雷电活动规律以及被保护物的特点等的基础上，综合国内外行业标准，才能设计全面可靠的整体防雷方案。

雷击故障点快速定位、雷击事故鉴别、雷电参数统计、防雷水平评估和雷电预警等方面都还有很多需要进一步的研究。由于本人能力和时间所限，本文还有许多地方有待进一步完善和提高，在今后的工作实践中继续对雷电防护措施的效果进行评价和总结。

致 谢

光阴荏苒，硕士研究生的学习即将结束，三年的学习生活使我受益匪浅。经历了几个月时间的磨砺，硕士毕业论文终于完稿，回首几个月来收集、整理、思索、停滞、修改直至最终完成的过程，我得到了许多的关怀和帮助，现在要向他们表达我最诚挚的谢意。

首先，要感谢我的父母、家人，没有他们，我的大学不可能取得如此成绩。面对熟悉的亲人，我们反而很难表达爱意。或许只有借助这样的机会，我才能放开声音对父母说声谢谢！在我 26 年的人生，他们给了我太多的帮助和支持，是父母的鼓励和支持使我得以安心求学，他们是我成长的不竭动力。

其次，要感谢我的老师们，没有他们，我的大学不可能取得如此进步和成长。首先，感谢我的导师罗维平老师，这篇论文是在罗老师的悉心指导下完成的，论文从选题、构思到定稿无不渗透着导师的心血和汗水；在三年的硕士研究生求学生涯中，她严肃的科学态度，严谨的治学精神，精益求精的工作作风，深深地感染和激励着我。当我对论文的思路感到迷茫时，您为我理清思路，指导我往一条比较清晰的思路上进行修改。罗老师不仅在学业上给我以精心指导，同时还在思想、生活上给我以无微不至的关怀，正是由于她在百忙之中多次审阅全文，对细节进行修改，并为本文的撰写提供了许多中肯而且宝贵的意见，本文才得以成型。在此谨向罗老师致以诚挚的谢意和崇高的敬意。

第三，要感谢我的朋友同学，没有他们，我的大学不可能如此值得留恋。感谢硕士期间所有给我提供帮助的师兄师姐们，感谢物理电子学 09 级 3 班的同学们，这些都是我研究生阶段最宝贵的财富。

“不积跬步，无以至千里；不积小流，无以成江海。”在今后的学习和工作中，我将继续保持武汉纺织大学养成的良好学风，从点滴中积累，让自己全面发展，更上一层楼。

参考文献

- [1] 周志敏, 周纪海, 纪爱华.电子信息系统防雷接地技术[M].北京:人民邮电出版社,2004
- [2] 唐志平, 杨胡萍, 邹一琴等.供配电技术[M].北京:电子工业出版社,2010
- [3] 杜澍春.高压输电线路防雷保护的若干问题[J].电力设备,2001,2(1):40-44
- [4] 郑诗程.合肥工业大学博士学位论文[C],光伏发电系统及其控制的研究,2005年3月
- [5] 赵争鸣等编著.太阳能光伏发电及其应用[M].北京:科学出版社,2005年
- [6] 俞炳, 罗树如.雷电监测网的运行监控[J].江西气象科技, 2004,27 (2) :44-45
- [7] 吴林霞.污水处理厂的防雷(接地)保护[J].甘肃水利水电技术, 2006,42 (2): 138-139
- [8] 崔容强, 赵春江, 吴达成.并网型太阳能光伏发电系统[M].北京: 化学工业出版社, 2007
- [9] GB50343-2004 建筑物电子信息防雷技术规范
- [10] PV Status Report 2004. European Commission, 2004
- [11] 应洪正,陈振明.避雷针设置不当造成的雷击事故事例[J].建筑电气, 2005,(2)32-35
- [12] 陈慈萱.过电压保护原理及运行技术[M].北京:中国电力出版社,2002
- [13] 刘蜀岷.避雷针保护范围不能绝对化[J].高电压技术,2005,(7):82-83
- [14] 许颖.别把避雷针(线)保护范围绝对化[J].广东电力,2004,17(2):1-4
- [15] 文远芳.高电压技术[M].武汉:华中科技大学出版社,2004.
- [16] 汪涛.湖北电网防雷状况调研报告[R].武汉:湖北省电力试验研究院, 2004
- [17] 谭绍祖.对深圳地区输电线路防雷措施的探讨[J].广东输电与变电技术,2003(3):50-55
- [18] 王益军.深圳电网架空输电线路综合防雷措施的应用及研究[J].广东输电与变电技术,2004(6):51-57
- [19] 张晓文, 孟善良, 张晓北等.太阳能热水器的防雷探讨[J].内蒙古气象, 2004 (4)
- [20] 梁曦东,陈昌渔,周远翔.高电压工程[M].北京:清华大学出版社,2003
- [21] 崔容强.中国光伏发电状况[R],2005
- [22] 王长贵, 王斯成. 太阳能光伏发电实用技术[M].北京: 化学工业出版社, 2005
- [23] 文香军.基于单片机的雷电监测系统[J].微计算机应用.2000, 21 (3): 161-163
- [24] 陆翔, 周奖,徐小琳等.一种比较经济的雷电监测系统方案设计[J]. 南宁师范高等专科学校学报.2009,26(65):125-127

- [25] Zen Kawasaki; Takeshi Morimoto; Akimasa Hirata; Tomoo Ushio; Akinori Matsumoto; Lee Jongho, An Operational VHF Broadband Digital Interferometer for Lighting Monitoring, IEEJ Trans, 2004, 124(12):1232-1238
- [26] Carlos A. Morales; Emmanouil N. Anagnostou; Earle Williams; J. Stanley Kriz, Evaluation of Peak Current Polarity Retrieved by the ZEUS Long-Range Lighting Monitoring System, IEEE GENSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS, JANUARY 2007, 4(1):32-36
- [27] E.N. Anagnostou, T. Chronis, and D.P. Lalas, New receiver network advances long-range lighting monitoring, EOS Trans, 2002, 83(50): 594-595
- [28] Zhou Wenjun, Wang Tao, Yu Jianhui, Zhang Shengfa, Cao Lijuan. Study on Real-time Lighting Current Monitoring System for Overhead Wire, 2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application, November 9-13, 2008.
- [29] Z. Flisowski, C. Mazzetti, R. Wlodek. New approach to the selection of effective measures for lightning protection of structures containing sensitive equipment, Journal of Electrostatics 60(2004): 287-295.
- [30] M. Stolzenburg. Observations of high ground flash densities of positive lightning in summertime thunderstorms, Mon. Weather Rev., vol. 122, no. 8, pp. 1740-1750, 1994.
- [31] T. Chronis and E.N. Anagnostou, Evaluation of a long-range lightning detection network with receivers in Europe and Africa, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 44, no. 6, pp. 1504-1510, Jun. 2006.
- [32] Marketbuzz 2006: Annual World Solar PV Market Report[R], 2006
- [33] Wang wenjing and research group, 2005-10-19, The status and policy of grid-connected PV in China
- [34] Lawrence L. Kazmerski. Solar photovoltaics R&D at the tipping point: A 2005 technology overview[J]. Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena, 2006: 1052135
- [35] Texas Instruments, TMS320C240x DSP Controllers Reference Set, Volume1: CPU, System and Instruction Set, 1997.
- [36] Texas Instruments, TMS320C240x DSP Controllers Reference Set, Volume2: Peripheral Library and Specific Devices, 1997.
- [37] Texas Instruments, DSP Solutions for BLDC Motors, 1997.
- [38] Texas Instruments, Implementation of a Sensorless Speed Controlled Brushless DC drive using TMS320F240, 1997.
- [39] Texas Instruments, TMS320C24x DSP Controllers Evaluation Module Technical Reference, 1997
- [40] TMS320LF/LC240xA DSP Controllers Reference Guide(CPU and Instruction

- Set).TI INSTRUMENTS, 2003.
- [41] 杨东凯, 梁帆, 凌桂龙.DSP 嵌入式系统[M].北京: 中国电力出版社, 2009,1.
- [42] 张雄伟.DSP 芯片的原理与开发应用[M].北京:电子工业出版社, 1997
- [43] TMS320C203, TMS320C209, TMS320LC203 Digital Signal Processors,Texas Instruments Incorporated,1996
- [44] TMS320C24X DSP Controllers Reference Set,Instruments Incorporated,1997
- [45] 王巨丰, 齐冲, 范李莉等. 避雷针使用中的相关问题的探讨[J].广西电力.2006, (4): 60-63
- [46] 应洪正,陈振明.避雷针设置不当造成的雷击事故事例[J].建筑电气,2005,(2)32-35
- [47] 刘蜀岷.避雷针保护范围不能“绝对化”[J].高电压技术,2005,(7):82-83.
- [48] 许颖.别把避雷针(线)保护范围“绝对化”[J].广东电力,2004,17(2):1-4.
- [49] 文远芳.高电压技术[M].武汉:华中科技大学出版社,2004.
- [50] 陆翔.基于 GPRS 雷电流参数采集与传输系统的研究[D].南宁:广西大学电力系统及其自动化, 2007
- [51] 孙褪, 孙鹏.湖北省高压输电线路防雷现状及综合防雷措施[J].中国电力, 2006,38 (2): 35-38
- [52] 杨文海.青海省雷电监测系统设计和工程建设思路[J].青海气象, 2007,6-8
- [53] 沐俊山, 雷治平, 张存华.雷电监测预警系统的原理及应用[J].山西气象, 2004, (4): 24-26
- [54] 冯桂力.雷电监测和雷电数据的应用[J].2002,22(2):25-27
- [55] 许小峰.国家雷电监测网的建设与技术分析[J].中国工程科学, 2002,4 (5): 7-13
- [56] 庞亚峰.陕西省雷电监测资料处理方法与评估[J].陕西气象, 2009,15-16
- [57] 鲁礼信, 张建华, 赵广田. 建筑物避雷装置存在的问题分析[J]. 河北工程技术高等专科学校学报 2003, (4):34-36

附录

附录 I 本人在攻读学位期间所发表的论文

- [1] 李少波, 罗维平. 光伏发电系统 MPPT 控制和实现方法的研究[J]. 变频器世界, 2011, (2): 42-44
- [2] Li Shaobo, Luo Weiping. Research on Lightning Monitoring System of Solar Photovoltaic Power Generation System. Advanced Research on Material Engineering, Architectural Engineering and Informatization, November 27, 2011[C], Wuhan, Vol.366(2012):117-120, ISSN 1022-6680, EI 收录, 收录号 20114714545826
- [3] 国家自然科学基金项目（青年科学基金项目），基于模块化液滴型微流阀控芯片的药物合成筛选组合平台研究，项目号：21105076，排序第 5