



“十三五”普通高等教育本科规划教材

DIANLI DIANZI ZHUANGZHI ZHONG
DE DIANXING CHUANGANQI JISHU

电力电子装置中的 典型传感器技术

李维波 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“

育本科规划教材

电力电子装置中 的典型传感器技术

编著 李维波

主审 陆继明



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材。

本书作为一本理论联系实际的实用教材,坚持以培养学生分析分题、解决问题的能力为宗旨,坚持贯彻理论与实践相结合、基础与应用相结合、教学与科研相结合的“三结合”原则。

全书分为两篇共10章,第一篇由重要电路知识、运算放大器、电磁兼容与PCB设计基础三章基础知识组成;第二篇分别介绍了传感器基础知识、电流传感器及其典型应用技术、电压传感器及其典型应用技术、温度传感器及其典型应用技术、湿度传感器及其典型应用技术、压力传感器及其典型应用技术、数字传感器及其典型应用技术。本书具有分析清晰、切中要点、例程完整、实例典型、图例丰富、技术实用、内容翔实等特点,除此之外,本书在结构上也是由浅入深、层层递进,能够使读者快速理解、深入学习。

本书可作为电气工程专业、自动化专业的高等院校的本科教材,也可作为从事相关工作的科研人员、技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子装置中的典型传感器技术/李维波编著. —北京:中国电力出版社, 2016. 6

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5123-9125-3

I. ①电… II. ①李… III. ①电力装置—传感器—高等学校—教材 IV. ①TM7

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第116184号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 http://www.cepp.sgcc.com.cn)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016年6月第一版 2016年6月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 22.5印张 553千字

定价 45.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

电力电子装置是借助电路、设计理论和相关分析开发工具,有效利用电力半导体器件[如功率二极管、晶体闸流管、可关断晶闸管(GTO)、电场控制器件(以IGBT为代表)等],以实现电能高效变换和控制的电力电子变换装置。电力电子装置包括整流装置(AC/DC)、逆变装置(DC/AC)、直流变流装置(DC/DC)、交流变流装置(AC/AC),以及其他各类电源、电动机调速装置、直流输电装置、感应加热装置、无功补偿装置、电镀电解装置和家用电器变流装置等,被广泛应用于交通运输、电力、通信、计算机、环境保护、新能源、高能武器制造等领域。

从原理上看,电力电子装置是通过控制电力半导体器件的开断来完成功率信号的调制和处理的。它作为一种典型的利用弱电信号控制强电信号、利用信息流控制功率流的能量变换装置,必然会受到电力半导体器件性能的制约,因而其承受过电压、过电流和过热的能力较差。现场运行经验表明,电动机、变压器等电气设备通常可以在大于额定电流几倍的情况下持续工作数秒或数分钟,相比而言,在同等条件下的电力半导体器件的耐受时间往往不会超过1s,否则就会损坏。因此,在设计电力电子装置时,不仅需要合理选择电力半导体器件的电压、电流等额定参数,还需要采取一些特殊的保护措施,以防止变换装置内的电力半导体器件因过电压、过电流、过热而损坏。要达到此目的,除了正确设计装置本身、选择合适的控制策略之外,还必须借助一些典型的传感器技术,既能够为装置本身提供必要的控制参变量,如电压、电流和位置(或者转速)等,还能够对装置运行状态进行实时感知、预警监视、诊断分析、风险评估和故障预测等,如获取与运行条件密切相关的物理量(如温度、冷却水压力或风速、湿度、和受力情况等)。

研究与实践表明,经常应用于电力电子装置中的典型传感器技术主要有电压、电流、温度、湿度、振动、应力、门控、烟雾、液位等传感器及其信号处理技术。它们保证了电力电子装置的可靠性和连续性,提高了设备的利用率。其突出表现为:

(1) 电力电子装置正常运行时,借助这些典型传感器技术:①能够获取确保装置正常运行所必需的参变量;②系统还能够实时监视该装置的运行状态,方便优化其运行状态或操控方式。

(2) 当电力电子装置发生故障或异常运行时,通过传感器技术所获取的关键性状态信息:①可以迅速隔离故障避免因故障扩大而带来灾难性的后果;②有利于快速定位故障点、缩短故障时间、及时恢复装置运行,提高故障排查的效率和命中率。

(3) 根据典型传感器技术所获取的关键性状态信息,合理控制电力电子装置中的关键性参变量(如电压和电流等)、装置的负荷,进一步改善装置的健康状态,确保装置安全、可靠运行。

在构建和操控电力电子装置的过程中,正确选择并合理使用典型传感器技术是十分关键和必要的。技术源于积累,成功源于执着。结合作者多年的科研经历来看,电力电子技术和

传感器技术,作为电气类工程技术人员必须掌握的重要技术,它们具有交叉性强、实践性强、时效性强等重要特点,并且涉及的概念多、知识面广、适用性宽,既难学又难记还难理解,因此,学习起来特别费劲,也很枯燥,如果不与动手实践相结合,看完书之后,大脑常常一片空白,所获甚少。为此,作者把从事传感器技术与大容量电力电子技术开发与应用过程中的设计案例所获得的经验技巧、心得体会结合入门知识,加以归类、凝练和拓展,形成《电力电子装置中的典型传感器技术》。

本书作为一本理论联系实际的实用教材,坚持以有效培养读者朋友分析问题、解决问题的能力为宗旨,在撰写过程中坚持贯彻理论与实践结合、基础与应用结合、教学与科研结合的“三结合”原则。书中摒弃生涩的理论分析,所采用的实例电路全为作者原创性科研成果,既有简洁的理论剖析,也有设计方法和使用技巧的介绍,它们或许在其他图书中很难见到,因此,本书希望将这些视为一粒粒珍珠,交给读者朋友,既授人以鱼,又授人以渔。当然,除了分析清晰、切中要点、例程完整、实例典型、图例丰富、技术实用、内容翔实之外,本书还具有以下特点:

(1) 实践性强,功底深厚。由于传感器技术与电力电子技术均是实践性强、涉及面广的交叉性学科技术,绝对不能离开相关的工程实际。手脑双全,是创造教育的目的。为此,作者根植于长期所从事的传感器技术和电力电子技术的相关开发与研究实践活动中,在撰写过程中坚持“三结合”的原则,避免读不懂的研究过程。书中所采用的实例电路全为作者原创性科研成果,既有完整的理论分析,也包含宝贵的应用技巧和设计心得。作者希望通过本书让读者学到更多的专业知识和科研方法,提高工作能力。

(2) 针对性强,有的放矢。全书始终面向电力电子装置的工程应用,从实际出发,弱化理论论述,强调分析设计,力图摆脱传统技术枯燥的表达方式。作者在精炼讲解应用于电力电子装置中的常用传感器的基本原理之后,结合自己的工程经历,详细分析在实际应用时有关它们的信号处理、变换技术、接口技术、隔离技术和电磁兼容技术等方面的设计技巧、分析方法和调试流程。除此之外,本书还有针对性地讲解传感器在工程应用中所遇到的相关事件的分析计算判据和选型方法等内容。言之难尽,而试之易知也,所以,本书大胆尝试将传感器技术与电力电子技术融合起来进行讲解,激发读者的动手兴趣,有利于培养其创新精神。

(3) 精心组织,方便阅读。作者站在初学者的角度,在叙述方法上,以清晰的脉络、简洁的语言、丰富的图例为主,力求做到由浅入深、循序渐进。在剖析思路上,力争坚持以下两个方面:

1) 将传感器的基本理论知识与电力电子技术工程实际应用有机结合,而不是割裂实际应用,仅仅简单罗列电路而已。

2) 将“是什么”“如何干”和“结果如何”辨证统一起来,让读者耳目一新,并在轻松地阅读过程中获得共鸣、收获快乐。根据作者自己多年的科研历程发现,设计失败的原因不是不会使用相关传感器,而是对有关基本电路的分析方法的生疏与不了解,正是问题的存在激发我们去学习,去实践,去观察。因此,全书注重知识铺垫,避免一些读者朋友不知道从哪里开始学习。读书之法,在循序而渐进,熟读而精思,所以,作者开篇不是讲解传感器知识而是温习 KCL 和 KVL 定理、戴维南定理和诺顿定理、分压器原理以及运算放大器方面的基本内容,再讲解应用于电力电子装置中的典型传感器的原理、作用特征、电路结构、工

艺技巧和使用方法。

(4) 例程完整,受众面广。现行的许多资料上面讲传感器如何确定每一个器件的参数、如何分析相关环节的误差并不完整,给零基础的初学者带来很多麻烦,最终他们只能死记硬背、生搬硬套。所以本书尽量做到每个例程,无论长短,尽量完整,既给出需求分析,还给出设计计算过程以及相关分析方法及其构建思路,因为尽管很多模块化电路可以在网上或者参考书中查到,但是,唯独设计思想、分析思路是需要自己独立建立的,我们需要用理论来推动实践,用实践来修正或补充理论。因此,在以后的学习和工作中,无论您遇到什么样的工程实际问题,建议读者都可以应用这些设计理念创造性地给出设计方案和解决方法。

本书可作为电气工程专业、自动化专业的高等院校的本科教材,也可作为从事相关工作的科研人员、技术人员的参考资料。

本书由李维波编著,由陆继明教授审阅,在编著过程中得到了许多同仁们的关怀和支持,并参阅了许多同行专家的论著和文献,在这里表示由衷的感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请各位同行、专家和广大读者批评指正。

作 者

2016年1月于馨香园

目 录

前言

第一篇 预备知识篇

第一章 重要电路知识	2
第一节 分压定理和分流定理	2
第二节 戴维南定理和诺顿定理	8
第二章 运算放大器	13
第一节 运算放大器概述	13
第二节 仪用运算放大器概述	23
第三节 隔离运算放大器概述	28
第四节 运放选型方法与实例分析	36
第五节 运放共模电压范例分析	50
第三章 电磁兼容与 PCB 设计基础	54
第一节 差模信号与共模信号	54
第二节 接地基本知识	63
第三节 PCB 设计重要知识	72

第二篇 应用于电力电子装置中的典型传感器技术

第四章 传感器基础知识	80
第一节 传感器的含义及其特性	80
第二节 传感器的分类方法	83
第三节 传感器的作用和地位	84
第四节 传感器的选型原则	86
第五节 传感器检测系统的基本构成	87
第六节 典型转换原理及其在传感器中的应用	90
第五章 电流传感器及其典型应用技术	99
第一节 应用背景	99
第二节 电流测量方法概述	103
第三节 霍尔电流传感器及其典型应用技术	105
第四节 使用霍尔电流传感器的注意事项	123
第五节 分流器及其典型应用技术	127

第六章 电压传感器及其典型应用技术	155
第一节 工作原理	155
第二节 选型方法	158
第三节 设计计算范例分析	159
第四节 使用霍尔电压传感器的注意事项	163
第五节 霍尔传感器的综合应用	166
第七章 温度传感器及其典型应用技术	170
第一节 电力电子装置监测温度的重要性	170
第二节 电力电子装置监测温度手段	171
第三节 热电偶及其典型应用技术	175
第四节 热敏电阻及其典型应用技术	183
第五节 Pt100 电阻及其典型应用技术	190
第六节 集成温度传感器及其典型应用技术	200
第七节 温度传感器使用注意事项	206
第八章 湿度传感器及其典型应用技术	208
第一节 电力电子装置监测湿度的重要性	208
第二节 湿度传感器的选型与使用	209
第三节 传感器 HM1500LF 及其典型应用技术	212
第四节 传感器信号滤波电路设计	216
第五节 根据传感器信号的不同选择滤波器电路	241
第九章 压力传感器及其典型应用技术	243
第一节 压力与压强	243
第二节 压力传感器及其分类	244
第三节 应变式压力传感器及其典型应用技术	245
第四节 压阻式压力传感器及其典型应用技术	261
第五节 压力传感器的选型方法	265
第六节 压力传感器的常见故障	267
第七节 设计水冷系统的注意事项	268
第十章 数字传感器及其典型应用技术	270
第一节 数字传感器概述	270
第二节 数字传感器在电力电子装置的综合应用	273
第三节 比较电路分析与设计方法	275
第四节 光耦电路分析与设计方法	292
第五节 几种典型数字传感器	306
第六节 几种模拟传感器的开关电路设计范例	326
附录 A 文中所用数据表	341
参考文献	351

第一篇 预备知识篇

电力电子装置借助电路、设计理论和相关分析开发工具,有效使用电力半导体器件[如功率二极管、晶体闸流管、可关断晶闸管(GTO)、电场控制器件(IGBT^①为代表)等],实现对电能高效变换和控制,并由此构成电力电子系统。简而言之,电力电子装置就是通过电力半导体器件的开断动作来完成功率信号的调制和处理。它作为一种典型的利用弱电信号控制强电信号、利用信息流控制功率流的变换装置,其根本的东西还是电路知识,因为在电力电子装置的设计过程中,我们必须通过模拟电路或者数字电路调制放大信号,得到我们所需的参与控制的信号和表征装置健康状况的状态信号。

电力电子装置主要有交流-直流(AC-DC)、直流-交流(DC-AC)、交流-交流(AC-AC)、直流-直流(DC-DC)4大类,它正朝着大功率、高效率、全数字化方向发展。绝大多数电力电子装置主要由控制电路、驱动电路、保护电路和以电力半导体器件为核心的主电路组成。所以,在电力电子装置的设计与构建过程中,实际上就是完成各个功能电路的设计、调试、安全运行与功能实现的一整套实施过程。

归根结底,最基本的是电路本身。电路是电流的通路,一个正确的电路应该包括下列基本组成部分:

- (1) 电源。电源起着把其他形式的能量转化为电能并提供电能的作用。
- (2) 用电器。用电器将电能转化为其他形式的能量。
- (3) 开关。开关控制电能的输送(电流的通断)。
- (4) 导线。导线起着连接电路元件和把电能输送给用电器的作用。

如果一个电路缺少了其中任何一部分,这个电路就不能工作或存在危险(如短路)。电路就是为了某种需要将某些电气设备或元件按一定的方式组合起来的功能模块。电路具有转换和传输能量、传递与处理信号、测量和存储信息等重要作用。作为电力电子装置的基础环节,电路也成为电力电子装置设计的重点和难点,更是电力电子装置故障的多发点和集结地,尤其是当装置的复杂度增加,它所需要的分析电路的技能越多、要求也越高。

工程实践表明,电路设计的优劣与否,对电力电子装置的安全运行与功能实现,起着非常重要的作用。研究与实践均表明,电路拓扑的优劣、所选电路参数是否恰当、电气量传输是否合理、强电与弱电是否隔离的良好、大功率电路的散热措施是否完备、装置内外是否兼容等,都将决定着电路设计的优劣,最终也决定着电力电子装置研制的成败。

^① Insulated Gate Bipolar Transistor, 绝缘栅双极型晶体管,是由BJT(双极型三极管)和MOS(绝缘栅型场效应管)组成的复合全控型电压驱动式功率半导体器件,兼有MOSFET的高输入阻抗和GTR的低导通压降两方面的优点。

第一章 重要电路知识

第一节 分压定理和分流定理

一、应用背景说明

随着市场对兆瓦级大功率变流装置的需求与日俱增,经常会碰到所选用的电力半导体器件的容量等级不能满足设计要求的情况,最常用的解决方法有:①系统级别的串并联;②装置级别的串并联;③器件级别的串并联。

研究与实践表明,最根本的解决方法当属第三种级别的串并联,就是将多个相同小功率器件进行串并联组合,可获得不同电流等级的功能模块。IGBT 并联方案,目前已成为一种趋势,其原因在于 IGBT 并联具有能够提供更高的电流密度、均匀热分布、灵活布局以及较高性价比(取决于器件类型)等优势。通过将小功率 IGBT 模块(包括分立式 IGBT)、大功率 IGBT 模块进行并联组合,可获得不同容量的功能模块,且并联的连接方式也是灵活、多样的。其中会涉及器件的均压和均流问题,分为静态均压、均流问题和动态均压、均流问题。

如图 1-1 所示,为晶闸管和 IGBT 的混成组合模块示意图,从电路实质来看就是用到分流和分压电路。

(1) 如图 1-1 (a) 所示,是由两个晶闸管 Th1 和 Th2 的串联而成的模块组件,其中电阻 R1 和 R2 为晶闸管 Th1 和 Th2 的均压电阻,阻容模块 R3 和 C1、阻容模块 R4 和 C2 为晶闸管 Th1 和 Th2 的吸收模块。

(2) 如图 1-1 (b) 所示,是由两组三个 IGBT (I_{g1} 、 I_{g2} 和 I_{g3}) 并联模块串联构建而成的单相 H 桥功能组件。

(3) 如图 1-1 (c) 所示,是由两组三个 IGBT (I_{g1-i} 、 I_{g2-i} 和 I_{g3-i} , $i=1, 2, 3$) 并联模块串联构建的三相 H 桥功能组件。

二、分压定理

在分析基本电路时,需要复习一下基尔霍夫定律,它包括基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。

(1) 基尔霍夫电流定律(KCL)是指任一集总参数电路中的任一节点,在任一瞬间流出(流入)该节点的所有电流的代数和恒为零。

(2) 基尔霍夫电压定律(KVL)是指任一集总参数电路中的任一回路,在任一瞬间沿此回路的各段电压的代数和恒为零。

分压电路如图 1-2 所示。由图 1-2 (a) 可知,滑动变阻器 R_w 两端接在电源 U_s 的正负极上,固定端和滑动端 W 分别与用电器的两端连接,这样就组成分压器电路,下面分几种情况讨论:

(1) 空载时。一旦滑动变阻器的可调端固定之后,它就等效为两个固定电阻如图 1-2 (b) 中的 R_{w1} 和 R_{w2} 所示。在空载时,其输出电压 U_{O1} 的表达式为

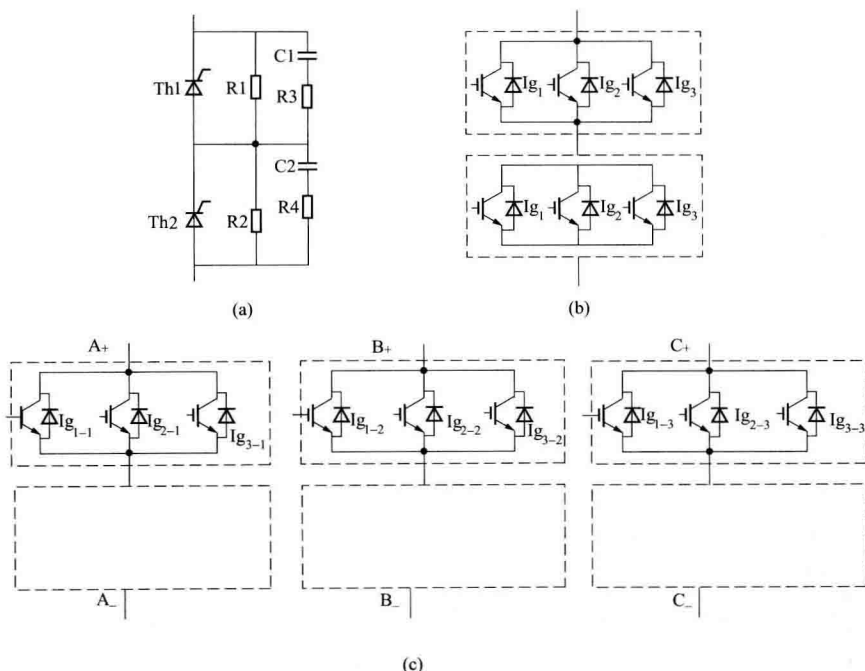


图 1-1 晶闸管和 IGBT 的混成组合模块示意图

(a) 两个晶闸管串联而成的模块组件；(b) 单相 H 桥功能组件；

(c) 三相 H 桥功能组件

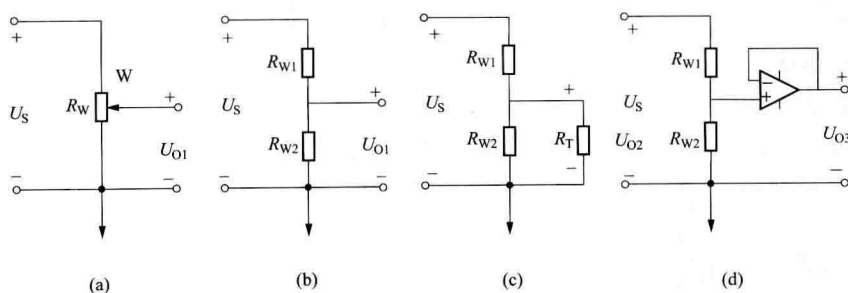


图 1-2 分压电路

(a) 基本分压器电路；(b) 空载情况；(c) 带载情况；(d) 基于运算放大器的跟随器

$$\begin{cases} U_{O1} = \frac{R_{W2}}{R_{W1} + R_{W2}} U_S = \frac{R_{W2}}{R_W} U_S \\ R_W = R_{W1} + R_{W2} \end{cases} \quad (1-1)$$

分析表达式 (1-1) 可知，当滑动变阻器的电阻值 R_W 固定不变时，输出电压 U_{O1} 与分压电阻 R_{W2} 成正比，其变化范围为 $0 \sim U_S$ 。

(2) 带载时。如图 1-2 (c) 所示，当接上负载（如测试设备）之后，假设测试设备的输入电阻为 R_T ，其输出电压 U_{O2} 的表达式为

$$\begin{cases} U_{O2} = \frac{R_{W2} // R_T}{R_{W1} + R_{W2} // R_T} U_S \approx \frac{R_{W2} // R_T}{R_W} U_S \\ R_W \approx R_{W1} + R_{W2} // R_T \end{cases} \quad (1-2)$$

由于存在关系式

$$R_{W2} // R_T < R_{W2} \quad (1-3)$$

所以

$$U_{O2} \approx \frac{R_{W2} // R_T}{R_W} U_S < \frac{R_{W2}}{R_W} U_S = U_{O1} \quad (1-4)$$

对比分析式(1-1)和式(1-4)得知,由于测试设备的输入电阻 R_T 的影响,带载后的输出电压 U_{O2} 的幅值比空载时的输出电压 U_{O1} 的幅值有所降低。

举例说明:

(1) 假设 $R_T = 100R_{W2}$, 那么 $U_{O2} \approx 0.99U_{O1}$, 电压幅值降低1%。

(2) 假设 $R_T = 1000R_{W2}$, 那么 $U_{O2} \approx 0.999U_{O1}$, 电压幅值降低0.1%。

由此可见,为了确保待测电压无失真地被拾取,要求测试设备的输入电阻 R_T 越大越好,至少为分压电阻 R_{W2} 的两个数量级以上。所以,在工程设计方面,建议采取图1-2(d)所示的基于运算放大器(以下简称运放)的跟随器的电路方法。电压跟随器的显著特点就是输入阻抗高,几乎不从信号源汲取电流,同时具有极低的输出阻抗,向负载输出电流时几乎不在内部引起电压降,可视为电压源。下面以OP07为例进行说明。

OP07运放是一种低噪声、非斩波稳零的双极性运算放大器。由于它具有非常低的输入失调电压(对于OP07A而言,最大为 $25\mu\text{V}$),低失调电压漂移(典型值为 $0.5\mu\text{V}/^\circ\text{C}$),所以在很多应用场合不需要额外的调零措施。同时OP07还具有输入偏置电流低(对于OP07A而言,为 $\pm 2\text{nA}$)、开环增益高(对于OP07A而言,为 300V/mV)、差分输入电阻 R_{id} 高(典型值为 $33\text{M}\Omega$)的特点,正是由于它具有低失调、高开环增益的特性,才使得它广泛应用于高增益测量电路和微弱信号的放大电路等。

三、分流定理

将两个电阻的首端、尾端分别连在一起,当接通电源后,每个电阻的端电压均相同,这种连接方式称为电阻的并联。如图1-3所示为分流电路,表示一个电流源向两个并联电阻供电的电路。

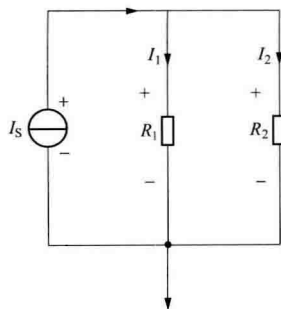


图1-3 分流电路

利用基尔霍夫定律,对图1-3所示的电阻并联电路进行分析,用电阻参数表示的两个并联电阻的分流公式为

$$\begin{cases} I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I_S \\ I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I_S \end{cases} \quad (1-5)$$

表达式(1-5)表示某个并联电阻中电流与总电流之间的关系。

四、工程范例分析

1. 基本概念

集电极开路又名开集极电路或OC门(Open Collector, 以下均用OC门),它是一种集成电路的输出装置。OC门实际上只是一个NPN型三极管,并不输出某一特定电压值或电流值。OC门根据三极管基极所接的集成电路来决定(三极管发射极接地),通过三极管集电极,使其开路并输出。而输出设备若为场效应三极管,则称之为漏极开路(Open Drain, 简称OD门),工作原理类似。

在工程设计过程中,有时需要将两个或两个以上与非门的输出端连接在同一条导线上,将这些与非门上的数据(状态电平)用同一条导线输送出去,即利用 OC 门来实现线与逻辑,但在输出端口应加一个上拉电阻 R_L 与电源相连,如图 1-4 所示为 OC 门应用电路的一般形式。图 1-4 (a) 所示的是 SN75452B 等效电路,图 1-4 (b) 表示其逻辑符号。在使用该电路时,需要外接一个电源 V_{CC} 及上拉电阻 R_L ,则构成集电极开路与非门电路。

如图 1-4 (c) 所示,当输入端全为高电平时,VT2、VT3、VT5 和 VT7 导通,VT4 和 VT6 截止,输出 Y 为低电平;如图 1-4 (d) 所示,输入端有一个为低电平时,VT2、VT3、VT5 和 VT7 截止,VT4 和 VT6 导通,输出 Y 为高电平(接近电源电压 V_{CC})。因此 OC 门完成了与非逻辑功能。

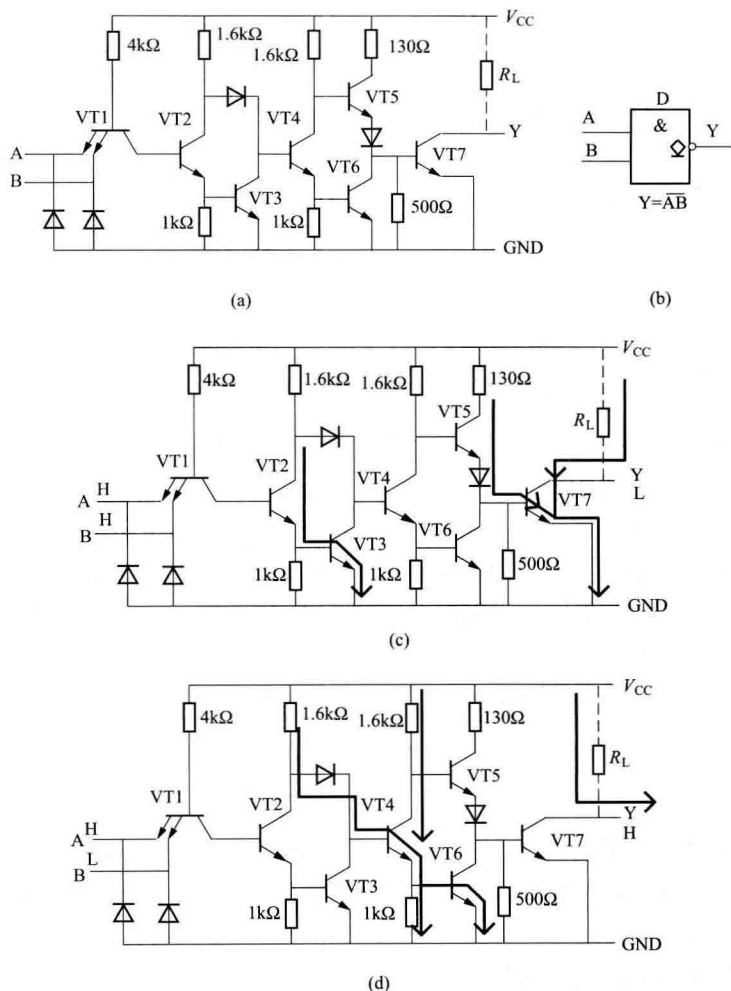


图 1-4 OC 门应用电路的一般形式

- (a) SN75452B 等效电路; (b) SN75452B 的逻辑符号;
 (c) 输入端全为高电平时; (d) 输入端有一个低电平时

2. 分析计算

(1) 上拉电阻 R_L 的计算方法。如图 1-5 所示为 OC 门中 R_L 取值计算示意图,

图 1-5 (a) 中, V_{OH} 表示 OC 与非门的输出端为高电平; I_{OH} 表示 OC 与非门的输出端为高电平时所对应的电流; I_{IH} 表示 OC 与非门的输出端为高电平时流入负载的电流; m 表示 OC 与非门的个数; n 表示负载的个数。图 1-5 (b) 中, V_{OL} 表示 OC 与非门的输出端为低电平; I_{OL} 表示 OC 与非门的输出端为低电平时所对应的电流; I_{IL} 表示 OC 与非门的输出端为低电平时流入负载的电流。

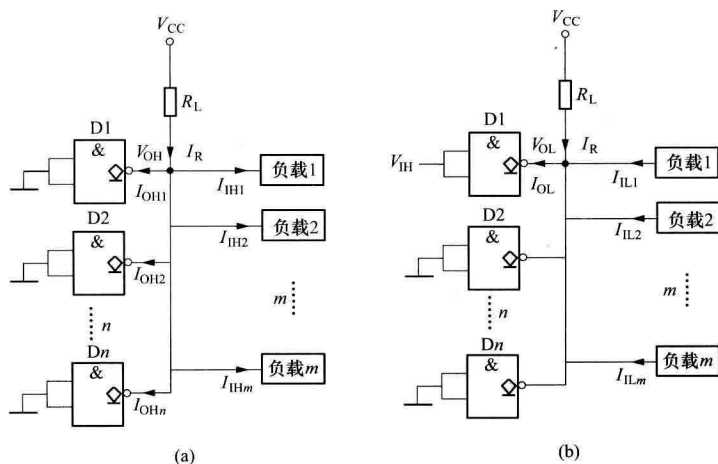


图 1-5 OC 门中 R_L 取值计算示意图

(a) 输入端为低电平; (b) 输入端有低电平也有高电平

如图 1-5 (a) 所示, 当全部 OC 与非门的输入端均接低电平 (如接地), 它们的输出端均为高电平 V_{OH} , 其表达式为

$$V_{OH} = V_{CC} - I_R R_L = V_{CC} - (nI_{OH} + mI_{IH})R_L \quad (1-6)$$

(2) 上拉电阻最大值 R_{Lmax} 的计算判据。要确保 OC 与非门输出端的高电平输出必须有效, 即 V_{OH} 必须超过 OC 与非门输出端的高电平的最小值 V_{OHmin} , 因此 OC 与非门输出端的高电平必须满足

$$V_{OH} = V_{CC} - (nI_{OH} + mI_{IH})R_L > V_{OHmin} \quad (1-7)$$

上拉电阻最大值 R_{Lmax} 的表达式

$$R_L \leq R_{Lmax} = \frac{V_{CC} - V_{OHmin}}{nI_{OH} + mI_{IH}} \quad (1-8)$$

为了分析极端情况, 假设仅有一个 OC 与非门开通, 其两个输入端均为高电平, 其他 OC 与非门的输入端均为低电平, 如图 1-5 (b) 所示, 因此, 全部低电平的输出电流 I_{OL} 均流入开通的 OC 与非门。

开通的 OC 与非门的输出端为低电平 V_{OL} 的表达式为

$$V_{OL} = V_{CC} - (I_{OL} + mI_{IL})R_L \quad (1-9)$$

那么, 流入开通的 OC 与非门的低电平的电流 I_{OL} 的表达式为

$$I_{OL} = \frac{V_{CC} - V_{OL}}{R_L} + mI_{IL} \quad (1-10)$$

(3) 上拉电阻最小值 R_{Lmin} 的计算判据。全部低电平的输出电流 I_{OL} 均流入开通的 OC 与非门且保证不超过三极管的额定电流 (如果不是三极管而是场效应管也可依照饱和电流来计

算), 即不超过开通的 OC 低电平输出电流的最大值 I_{OLmax} (也可以利用 OC 低电平输出的最大值 V_{OLmax} , $V_{OLmax} = I_{OLmax} \times R_{sat}$, R_{sat} 表示三极管的饱和导通电阻, 在 OC 门电路的器件参数手册中查到) 即

$$I_{OL} = \frac{V_{CC} - V_{OL}}{R_L} + |mI_{IL}| < I_{OLmax} \quad (1-11)$$

因此, 上拉电阻最小值 R_{Lmin} 的表达式为

$$R_L \geq \frac{V_{CC} - V_{OL}}{I_{OLmax} - |mI_{IL}|} = R_{Lmin} \quad (1-12)$$

综上所述, 计算获得最小值 R_{Lmin} 和最大值 R_{Lmax} 后, 上拉电阻的取值为 $R_{Lmin} \leq R_L \leq R_{Lmax}$, 即介于最小值 R_{Lmin} 和最大值 R_{Lmax} 之间, 酌情选择中间值即可。但是, 如果考虑省电因素, 而低电平要求不是太严格的话, 建议取较大值的上拉电阻。

OD 门的上拉电阻的取值可参照 OC 门上拉电阻的取值过程进行计算、取值。

(4) 上拉电阻的作用。

1) 当 TTL 电路驱动 CMOS 电路时, 如果 TTL 电路输出的高电平低于 CMOS 电路的最低高电平 (一般为 3.5V 左右), 这时就需要在 TTL 的输出端接上拉电阻, 以提高输出高电平的值。

2) OC 门电路必须加上拉电阻, 以提高输出的高电平值。

3) 为加大输出引脚的驱动能力, 有的单片机管脚上也经常使用上拉电阻。

4) 在 CMOS 芯片上, 为了防止静电造成损坏, 不用的管脚不能悬空, 一般接上拉电阻 (当然也有直接接电源脚, 还有的接地线脚, 视具体情况而定)。

5) 芯片的管脚加上拉电阻来提高输出电平, 从而提高芯片输入信号的噪声容限, 增强抗干扰能力。

6) 提高总线的抗电磁干扰能力。管脚悬空就比较容易接受外界的电磁干扰。

7) 长线传输中电阻不匹配, 容易引起反射波干扰, 加上拉电阻 (或者下拉电阻) 以使电阻匹配, 有效抑制反射波干扰。

(5) 上拉电阻阻值的选择原则包括:

1) 驱动能力与功耗的平衡。从节约功耗及芯片的灌电流能力考虑应当足够大, 因为电阻大, 电流就小; 上拉电阻越小, 驱动能力越强, 但功耗越大, 设计时应注意两者之间的均衡。

2) 下级电路的驱动需求。当输出高电平时, 开关管断开, 应适当选择上拉电阻以能够向下级电路提供足够的电流。

3) 高低电平的设定。不同电路的高低电平的门槛电平会有不同, 应适当设定上拉电阻, 以确保能输出正确的电平。当输出低电平时, 开关管导通, 上拉电阻和开关管导通电阻分压值应确保在零电平门槛之下。

4) 频率特性。上拉电阻和开关管漏源极之间的电容和下级电路之间的输入电容会形成 RC 延迟, 电阻越大, 延迟越大。因此, 上拉电阻的设定应考虑电路在这方面的需求。特别是高速电路, 过大的上拉电阻, 可能导致脉冲的边沿变平缓, 引起输出电平的延迟。

综合考虑以上原则, 再结合具体电路分析确定上拉电阻的取值大小, 通常在 $1k \sim 10k\Omega$ 之间选取。

对于下拉电阻而言，一般拉到 GND，用于设定低电平或者是阻抗匹配（抗回波干扰），与上拉电阻道理类似，此处不再赘述。

第二节 戴维南定理和诺顿定理

一、电路的等效变换

大量实践表明，在电力电子装置的设计过程中，为了获取电路中关键性电气元件的电气参数，大多时候就要换个角度去分析，其中最常用的方法就是电路的等效变换，它作为一种能保证电路的非变换部分中的电压、电流在变换中维持不变的特殊变换形式，应用非常广泛。比如，在分析电路时遇到多个电压源串联的问题，通常就是将它们等效为一个电压源。同理，遇到多个电流源并联的情况，一般的做法是将它们等效为一个理想电流源。理论研究表明，要保证非变换部分中的电压、电流在变换中维持不变，变换成的新电路部分必须是变换部分的等效电路，即前者与后者应具有相同的外特性。所以，实现这种变换的关键是求出电路变换部分的等效电路，变换过程中经常会用到戴维南定理和诺顿定理，下面对它们进行简单的复习，以加深理解。

二、戴维南定理

任一线性有源二端网络 N ，对其外部电路来说，都可以用电压源和电阻串联的组合等效代替，该电压源的电压等于网络的开路电压 U_{OC} ，该电阻等于网络内部所有独立源作用为零情况下网络的等效电阻 R_0 ，如图 1-6 所示，由戴维南定理所得的电压源等效电路称为戴维南等效电路，其中开路电压 U_{OC} 和等效电阻 R_0 用图 1-7 表示， N_0 为将 N 中所有独立源置零后所得无源二端网络。

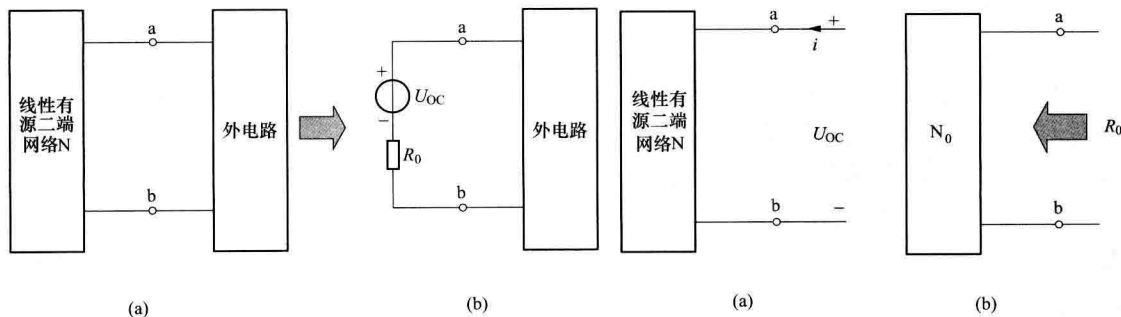


图 1-6 戴维南等效电路

图 1-7 开路电压 U_{OC} 和等效电阻 R_0 的表示方法

(a) 线性有源二端网络 N ; (b) 电压源和电阻串联的组合等效代替 (a) 开路电压 U_{OC} 表示方法; (b) 等效电阻 R_0 表示方法

对于求解等效电阻 R_0 的方法有三种：

(1) 直接法。应用等效变换方法（如串、并联等效或三角形与星形网络变换等）直接求出无源二端网络的等效电阻。

(2) 外加电源法。如图 1-8 所示为无源二端网络 N_0 两端外加电源，其包括两种方法，①加压求流法，即在无源二端网络 N_0 两端外加电压源，如图 1-8 (a) 所示，求出回路中电流；②加流求压法，即在无源二端网络 N_0 回路中加电流源，如图 1-8 (b) 所示，求出网络 N_0 两端电压，则有

$$R_0 = R_{ab} = \frac{U_S}{I} \quad (1-13)$$

(3) 开路、短路法。如图 1-9 所示, 将有源二端网络开路后, 求出其开路电压 U_{OC} , 如图 1-9 (a) 所示; 再将二端网络短路, 求出其短路电流 I_{SC} , 如图 1-9 (b) 所示。开路电压与短路电流的比值即为戴维南等效电源的内阻 R_0 , 即

$$R_0 = \frac{U_{OC}}{I_{SC}} \quad (1-14)$$

对于戴维南定理, 用比较通俗的解释就是说, 把一个相对复杂的含有独立源的电路变

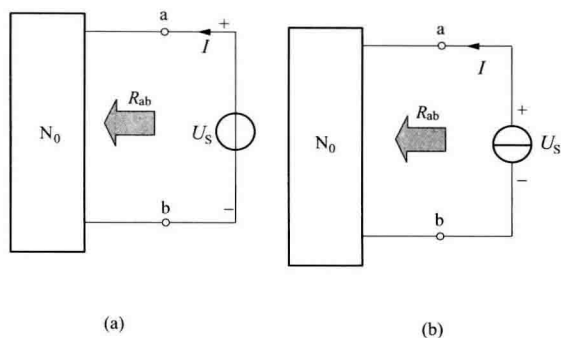


图 1-8 无源二端网络 N_0 两端外加电源

(a) 外加电压源; (b) 外加电流源

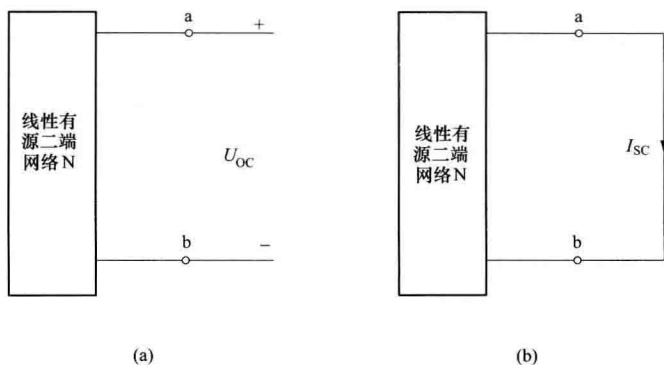


图 1-9 开路、短路法

(a) 求开路电压 U_{OC} ; (b) 求短路电流 I_{SC}

成一个黑匣子, 只用一个电压和一个电阻就能等效变换这个电路了。现将戴维南定理的基本解题步骤小结如下:

- (1) 将待求支路与原有源二端网络分离, 对断开的两个端钮分别标以记号 (如 a、b)。
- (2) 应用所学过的各种电路求解方法, 对有源二端网络求解其开路电压 U_{OC} 。
- (3) 有源二端网络内部所有独立源作用为零 (其含义就是理想电压源短路、理想电流源开路) 情况下, 对无源二端网络求等效电阻 R_0 。
- (4) 将断开的待求支路与戴维南等效电路接上, 最后根据欧姆定律或分压、分流关系求出电路的待求响应。

三、诺顿定理

任一线性有源二端网络 N, 对其外部电路来说, 都可以用电流源和电阻并联的组合等效代替, 该电流源的电流等于网络的短路电流 I_{SC} , 该电阻等于网络内部所有独立源作用为零情况下网络的等效电阻 R_0 , 如图 1-10 所示, 由诺顿定理所得的电流源等效电路称为诺顿等效电路。

短路电流 I_{SC} 和等效电阻 R_0 的表示方法如图 1-11 所示, N_0 为将 N 中所有独立源置零后所得无源二端网络。凡是戴维南定理能解决的问题, 诺顿定理也能解决, 其解题步骤与戴