

学校编码: 10384

类号_____密级_____

学号: X200430009

UDC _____

廈門大學

硕士学位论文

低电源电压下低压差线性稳压器的设计

Design of Low Drop-Out Regulator with Low Voltage

肖华

指导教师姓名: 刘舜奎 高级工程师

专业名称: 仪器仪表专业

论文提交日期:

论文答辩时间:

学位授予日期:

答辩委员会主席: _____

评阅人: _____

200 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

随着工艺的发展及许多 SOC 产品及便携式电子产品的工作电压不断下降, 省电观念越来越引人注目, 对提供电源的芯片要求越来越高。针对供电电源日趋低压化, 以及节能环保意识成为各个国家及众多消费者的共识, 低电源电压下能工作且具有低功耗成为线性稳压器的发展趋势。本文提出了一种输出电压 1.5V, 输入电压可以低至 1.7V 的情况下稳定工作并能提供 300mA 电流的低压差线性稳压器电路, 整个线性稳压器电路的静态电流低于 40 μ A。与传统的低压差线性稳压器相比, 本文设计的低压差线性稳压器电路系统提出了利用有源前馈米勒补偿 (AFFC) 与共源共栅米勒补偿相结合的新颖动态米勒补偿结构, 这种补偿结构下的电路系统具有恒定的带宽 (100KHz 以上), 大大提高了系统的瞬态响应性能。同时由于输出电压调节器模块采用了三级放大器结构, 整个电路系统的增益提高了 30dB 左右, 使得电压调节器系统具有极高的线性调整能力和负载调整能力。本文还设计了可以工作在低至 1.5V 电源电压下的具有 75dB 的电源抑制比的自偏置电流带隙基准源电路。该带隙基准源在 -20°C 到 120°C 范围内具有 12ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 的温度特性。同时该带隙基准源带有快速启动电路, 启动时间小于 20 μ s。还有本文还设计了过流保护电路和带有迟滞特性的过温保护电路。本文设计的电路都利用 Hspice 软件进行了详细的仿真验证。

关键词: 线性稳压器 带隙基准 误差放大器

Abstract

With the developments of electronics and telecommunication, portable electrical products become more and more popular. The developments of power management technologies and applications are rapidly promoted. A high-accuracy, micro power and low-dropout (LDO) voltage regulator is presented in this paper. A novel compensation structure that using the Active-Feedback Frequency Compensation (AFFC) scheme and the Cascode Miller Compensation scheme is presented, which to solve the stability problem of low dropout voltage regulators. Compared with the conventional methods, it keeps the bandwidth stable to improve the performance of transient response greatly. The new LDO effectively overcomes the stability problem, facilitates the use of a ceramic capacitor. The LDO voltage regulator's system increases the open loop gain by 30dB by using the structure of three stage amplifiers, which makes the LDO have high line regulation and load regulation specification. The new LDO was operable at input voltage 1.7V.

A novel band-gap reference structure is presented, which has the bias current of OP AMP that generated by the band-gap voltage reference self, thus having the PTAT current generator omitted, reducing the chip area and making the reference current closer to the ideal PTAT current. Simulation result show that the band-gap voltage regulator temperature coefficient is 12ppm/°C within the temperature range: -20°C ~120°C, the power rejection at low frequency is 75dB, and the quiescent current of this band-gap voltage reference is about 12uA.

The function of preventing temperature and current from over ranging is designed in the regulator.

Key words: linear regulator band-gap reference amplifier

目录

厦门大学学位论文原创性声明	I
厦门大学学位论文使用著作权声明	II
摘要	III
Abstract	IV
目录	V
图目录	VIII
第一章 引言	1
一、电源管理的技术发展趋势	1
1. 节能环保	1
2. 低压低功耗, 高性能和小的占用空间	1
二、电源管理 IC 的分类及其应用	2
1. AC/DC 变换器	2
2. DC/DC 变换器	2
3. 线性稳压器	2
三、本文的工作及安排	2
第二章 低压差线性稳压器的基本原理以及主要参数	4
一、低压差线性稳压器的基本原理	4
二、低压差线性稳压器的主要参数	5
1. 输出电压	5
2. 最大输出电流	5
3. 落差电压	6
4. 静态电流	6
5. 功耗和效率	6
6. 负载调整率	7
7. 线性调整率	8
8. 瞬态响应	8
9. 电源纹波抑制比	9
10. 输出精度	10

第三章 低压差线性稳压器的系统分析	11
一、概述	11
二、交流分析	11
1. 负载条件	11
2. 频率响应分析	12
3. 电路设计要点	14
三、瞬态分析	16
1. 电路瞬态响应分析	16
2. 电路设计要点	18
四、串联调整管的设计考虑	18
五、误差放大器的设计考虑	18
六、基准电压源的设计考虑	19
第四章 带隙基准源设计	21
一、概述	21
二、基准的要求以及可实现性	21
三、PN 结二极管的温度特性	22
四、带隙基准源的基本原理	22
五、常用电压模带隙电压基准结构设计	24
1. 基于运放控制的电压带隙基准	24
2. 基于电流镜控制的电压带隙基准	24
3. 基于亚阈电流控制的电压带隙基准	25
六、带隙基准源实际电路设计	27
1. 实际带隙基准电路设计	27
2. 差分运放的失调影响	28
3. 启动电路和补偿电路	29
4. 电源抑制比仿真	29
5. DC 仿真	30
6. 瞬态仿真	30
第五章 误差放大器设计	32

一、概述	32
二、电压调节器中误差放大器的类型	32
1. 简单的跨导型放大器	32
2. 对称型跨导放大器	33
3. 折叠式共源共栅放大器	34
4. 衬底驱动式放大器	35
三、误差放大器实际电路设计	35
四、仿真结果	40
第六章 过温过流保护电路设计	42
一、概述	42
二、过流保护	42
三、过温保护	43
四、电路仿真结果	44
第七章 总结	45
参考文献	46
致谢	49

图目录

- 图 2-1 恒压源
- 图 2-2 线性稳压器的等效框图
- 图 2-3 低压差线性稳压器的基本电路框图
- 图 2-4 LDO 线性稳压器的静态电流
- 图 2-5 线性稳压器的输出电压和输出电流关系曲线图
- 图 2-6 线性稳压器的输出电压与输入电压关系曲线图
- 图 3-1 低压差线性稳压器的系统框图
- 图 3-2 外部负载条件
- 图 3-3 电压调节器的电路框图
- 图 3-4 电压调节器系统幅频波特图
- 图 3-5 电压调节器瞬态响应曲线
- 图 4-1 PTAT 电流产生电路
- 图 4-2 带隙基准电压的形成模式
- 图 4-3 OP 控制的带隙电路
- 图 4-4 基本电流镜控制的 BGR
- 图 4-5 Cascode 结构控制的 BGR
- 图 4-6 基于亚阈电流控制的 BGR
- 图 4-7 基于运放控制的带隙基准源的实际电路
- 图 4-8 电源抑制比曲线（不带旁路电容）
- 图 4-9 电源抑制比曲线（带旁路电容）
- 图 4-10 基准与电源电压的关系
- 图 4-11 温度特性曲线
- 图 4-12 带隙基准电路的瞬态仿真
- 图 5-1 基于简单跨导放大器结构的电压调节器
- 图 5-2 基于对称跨导型放大器结构的电压调节器
- 图 5-3 基于折叠式共源工栅放大器结构的电压调节器
- 图 5-4 传统 LDO 稳压器框图
- 图 5-5 采用 AFFC 补偿结构的 LDO 稳压器框图
- 图 5-6 电压调节器的实际电路
- 图 5-7 实际电路仿真曲线图一
- 图 5-8 实际电路仿真曲线图二
- 图 6-1 PMOS 上拉的过流保护电路
- 图 6-2 过温保护电路
- 图 6-3 过流保护和过温保护仿真结果

第一章 引言

一、电源管理的技术发展趋势^[1~8]

近几年，由于中国大陆的整机电子产品，特别是便携式消费电子、计算机和通信以及汽车电子产品的产量猛增，使得中国电源管理芯片的市场规模保持快速增长的态势。据市场研究机构 iSuppli 公司预测，2009 年中国出货的电源管理 IC 销售额将比 2008 年下降 12.2%，从 42 亿美元降到 37 亿美元。但是，电源管理 IC 的销售额将在 2009 年下半年开始回升，到 2010 年将会增长 8.4%。iSuppli 公司认为，在 2008 年 42 亿美元的销售额中，线性调节器、DC-DC 开关调节器、驱动器 IC 和电源管理占了大部分，合计销售额达 24 亿美元，占 58.16%。且在未来几年这些领域将在总体销售额中占较大比例。电源管理始终是模拟 IC 市场最亮的看点，从 2004~2009 年电源管理市场的年复合增长率将超过 16%，功率模拟器件将保持持续强劲地增长，PC、手机、数码相机、MP3 以及数字电视成为最主要的增长市场。随着各种终端产品的日益普及和功能的不断加强，对电源管理 IC 产品提出了更高的要求。节能环保已经成为各个国家及众多消费者共识，电源管理 IC 的发展也呈现以下两种趋势。

1. 节能环保

针对节能这一电源管理领域的热点。世界各地的政府机构和行业组织制定了许多能耗规范标准，单是美国就有四个能效标准，欧洲提出至少七项标准以及澳大利亚、韩国和日本都制定了相应的能效规范。而中国政府也开始采取各种措施来倡导节能计划，为国内电源产业制定了各种相关能效标准。这些过高的能效规范为电源管理产商制造了更高的门槛。还有现在各种电子产品的寿命在不断延长，这也要求半导体器件尤其是电源这部分需要节能以期获得相对更长的使用寿命。

2. 低压低功耗，高性能和小的占用空间

首先，随着绿色环保意识的普及，低能耗设计越来越受到厂商、消费者和各国政府的关注，高效电源设计正在成为影响电子系统设计的关键技术之一；第二，随着便携式产品的迅速发展，便携式产品集成的功能越来越多，这就需要大大压缩每一功能块所占用的体积空间。第三，随着半导体工艺的发展及许多 SOC 产品及便携式电子产品的工作电压不断下降，作为电源管理芯片自然需

要大大降低工作电压以提高能效。总之，电源设计正往低供电电压、低待机功耗、高能效以及减小占用面积的方向发展。

二、电源管理 IC 的分类及其应用^[9]

1. AC/DC 变换器

AC/DC 变换，即将交流变换为直流，也常称开关整流器；它不仅包含整流，而且整流后又做了 DC-DC 变换。因输入源是交流电，必须经过整流和滤波，体积较大的滤波电容器是省不掉的；还有就是受限于安全标准，AC/DC 电源管理很难做到体积小。如果在 AC/DC 变换器中集成功率因素校正模块（PFC）或脉宽调制模块（PWM），则能有效减少电网污染并提高转换效率。在 AC/DC 应用中，例如 VCR、SVR、STB、DVD 和 DVCD 播放器、打印机、传真及扫描设备中的开关电源，要求的是高功率效率，而待机功耗是其中一大关键。

2. DC/DC 变换器

DC-DC 变换就是直流变换为直流，分为升压型 DC/DC 转换器、降压型 DC/DC 转换器和升压降压型 DC/DC 转换器三种类型。DC/DC 转换器的输入电压一般来自整流器或者蓄电池，常用的电压有 12V/24V/48V/60V 等 4 种，整流器就是 AC/DC，已经经过一次隔离。DC/DC 转换器的优点是效率高、可升压降压以及输出功率大等；缺点是电感器的频率外泄干扰难以避免，还有电源纹波抑制效果较差。

3. 线性稳压器

线性稳压器，即调整管工作在线性条件下的稳压器，它包括低压差线性稳压器（LDO）与超低压差线性稳压器（VLDO）。低压差线性稳压器是最简单的线性稳压器，线性稳压器只能把输入电压降为更低的电压，它最大的优点是电源纹波抑制效果好、使用方便、低成本；它的缺点是电源转换效率不高。超低压差线性稳压器（VLDO）的输入电压范围接近 1V，其压差低于 100mV，甚至 30mV，内部基准接近 0.5V。VLDO 的输出纹波可低于 1mV_{p-p}。将 VLDO 作为一个降压型开关稳压器的后稳压器就可容易地确保低纹波。

三、本文的工作及安排

针对前面的分析，本文旨在设计一个能在低供电电压（低至 1.7V）下工作的具有低功耗、高电源纹波抑制比的低压差线性稳压器。该线性稳压器设定输出电压是 1.5V（具体输出电压可以通过改变反馈电阻比例设定）；具有极高的负载

调节能力和线性调节能力；恒定的带宽使得具有良好的瞬态响应性能；在 1.8V 的输入电压下，提供 300mA 的负载电流，且具有较低的输入输出电压差。下面是本文的章节工作安排，前面三章的工作主要是查阅并提取整理资料的有用信息构建整个系统，后面几章的工作则主要是根据已有的方向进行实际电路的结构设计和参数设计，然后通过仿真修正具体参数值，最后得到可用的实际电路。

第一章，主要介绍本文设计研究工作的前提及背景，本章中的数据资料均来自所查阅的文献资料。

第二章，根据查阅到的资料列出低压差线性稳压器的基本原理以及主要参数。

第三章，利用已有的关于线性稳压器系统方面的资料，建立起低压差线性稳压器电路系统的整体框架，并且列出需要注意的电路设计要点。

第四章，设计一个具有一阶补偿的低电源电压（1.5V）下就能工作的低温度系数、高电源抑制比和带有快速启动电路的带隙基准源。并利用 Hspice 软件进行仿真验证。

第五章，设计一个低压、高增益并且具有动态补偿效果的误差放大器。

第六章，过温保护电路以及过流保护电路设计。

第七章，对本文的设计工作做总结。

第二章 低压差线性稳压器的基本原理以及主要参数

一、低压差线性稳压器的基本原理^[10]

线性稳压器其实就是一个恒压源，线性稳压器的基本特性就是它能够随着负载电阻的改变而改变自身内阻，从而保证输出电压的恒定。其实，实现恒压输出有两种方法。一种是恒压源内阻相对负载电阻来说极小，另一种就是内阻与负载电阻的比值不变。如图2-1所示，如果电源的内阻远小于负载电阻，那么，落在内阻上的压降很小，电源的输出电压值受负载变化的影响将会很小，几乎可以忽略不计，这样也能达到输出电压恒定的目的。

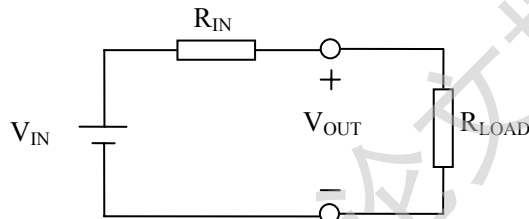


图2-1 恒压源

如图 2-1 所示，恒压源的输出电压表达式如下：

$$V_{OUT} = \frac{V_{IN}}{1 + \frac{R_{IN}}{R_{LOAD}}} \quad (2-1)$$

看式 (2-1)，我们可以发现如果 R_{IN}/R_{LOAD} 是一个不变的比值，则输出电压也将会是一个恒定的值。这就要求有一个能够感应负载变化的电路，并通过反馈去调整可变内阻，实现内阻与负载电阻的比值为—常量 k 。则输入电阻与负载成—线性关系： $R_{IN} = k R_{LOAD}$ ，能完成这样的功能的恒压源基本上是一个线性稳压器了，如图2-2所示。

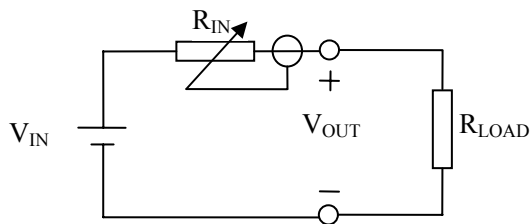


图2-2 线性稳压器的等效框图

线性稳压器是存在输入输出电压差的，如式（2-2）所示，k值越小，则输入输出电压差就越小。

$$V_{IN} - V_{OUT} = V_{IN} - \frac{V_{IN}}{1+k} = V_{IN} \frac{k}{1+k} \quad (2-2)$$

低压差线性稳压器的基本电路框图如图 2-3 所示，主要由基准源、误差放大器、输出调整单元和取样反馈网络单元组成，实际电路应该还包括有过温保护电路、过流保护电路、输出短路保护电路等。

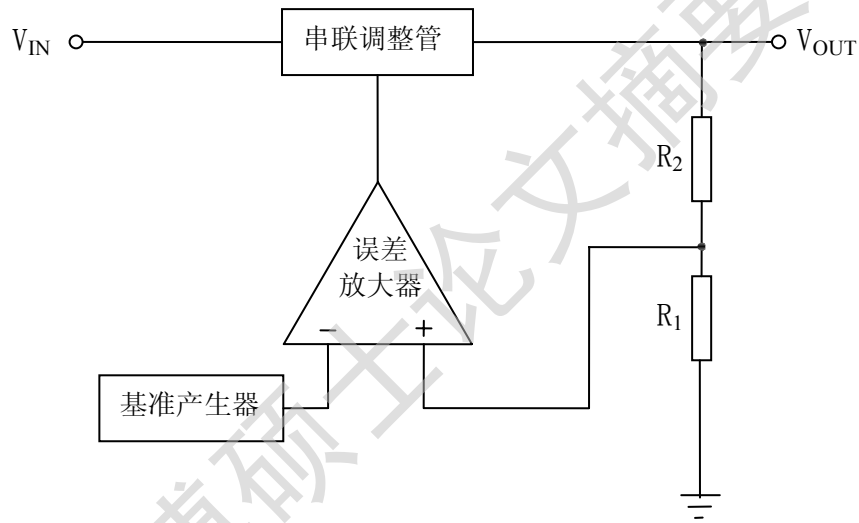


图 2-3 低压差线性稳压器的基本电路框图

电路的基本工作原理是：取样反馈电压加在误差放大器的同相输入端，与加在反相输入端的基准源电压比较，两者的差值经放大器放大后控制调整管上的压降（即控制调整管的导通阻抗与负载阻抗的比例值不变），从而达到稳定输出电压的目的。当输出电压 V_{out} 降低时，基准电压与取样电压的差值增加，误差放大器输出的驱动电压减小，串联调整管驱动电流增大，从而使输出电压升高。相反，若输出电压 V_{out} 超过所需要的设定值，误差放大器输出的驱动电压增大，从而使输出电压降低。正常工作过程中，输出电压的校正连续进行，调整时间只受误差放大器和输出串联调整管回路反应速度的限制。

二、低压差线性稳压器的主要参数^[11~13]

1. 输出电压(Output Voltage)

输出电压是低压差线性稳压器重要的参数，是线性稳压器设计时要考虑的系统应用要求。也是电子应用设计者选用线性稳压器时需要考虑的参数。低压差

线性稳压器的输出电压通过反馈电阻比例来调整，有时把比例电阻放到外面以方便电路应用设计者调节输出电压值。从图 2-3 上可以看出输出电压的可调范围跟加在误差放大器反相输入端的基准产生的参考电压有着紧密关系，输出电压一般都是大等于参考电压。

2. 最大输出电流(Maximum Output Current)

最大输出电流即稳压器所能提供的最大负载驱动电流。通常，输出电流越大，输出串联调整管的尺寸也越大，系统稳定性设计难度相对也提高，从而提高稳压器的成本。对于应用工程师来说，为了降低成本，应根据所需的电流值选择适当的稳压器。

3. 落差电压(Dropout Voltage)

落差电压即输入输出电压差，是低压差线性稳压器的一个重要参数。输入输出电压差的值越小，则代表着线性稳压器的能效就越高，就越省电。例如当蓄电池接近耗尽时，蓄电池上的电压会有所下降，输入输出电压差越小则说明在蓄电池接近放电完毕时，线性稳压器仍可以输出稳定的电压，从而延长了电池的使用时间。这个参数可以用调整管的导通电阻 R_{on} 来定义：

$$V_{drop-out} = I_{load} R_{on} \quad (2-3)$$

4. 静态电流(Quiescent Current)

如图 2-4 所示，线性稳压器的静态电流 I_q 可以表示为输入输出电流差，该电流有时也叫接地电流。静态电流越小，意味着电流使用效率越高。

$$I_q = I_i - I_o \quad (2-4)$$

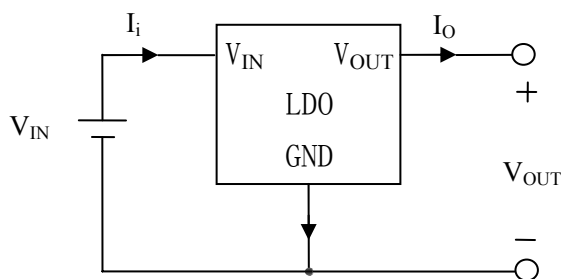


图 2-4 LDO 线性稳压器的静态电流

静态电流即 LDO 芯片本身工作消耗的电流，它包括偏置电流（如带隙基准源、误差放大器、保护电路以及采样电阻）和串联调整管的栅极驱动电流。静态电

流还受串联调整管、芯片布局以及环境温度的影响。

如果调整管是用双极型器件，则静态电流还随着负载电流的增大而增大，这是因为双极型器件是电流驱动器件。由于 MOS 电路是电压驱动的，所以用 MOS 调整管的 LDO 的静态电流几乎是恒定的。对于比较注重电路功耗的应用环境来说，使用 MOS 器件 IC 和 MOS 调整管是很有必要的。

5. 功耗和效率(Efficiency)

在电源是使用电池的电子产品中, 功耗越低或者说电源效率越高就意味着电池使用时间越长。线性稳压器的功耗为输入功耗减去输出功率，如式 (2-5) 所示。在式 (2-5) 中，前一项是串联调整管产生的功耗，后一项是静态电流功耗。式 (2-6) 是LDO效率表达式，可以看出, 输入输出电压差越低、静态电流(输入电流与输出电流之差) 越低线性稳压器的工作效率就越高。功耗和效率的表达式说明对于线性稳压器，低落差电压（输入输出电压差）、低静态电流就意味着低功耗、高效率。

$$P_w = V_i I_i - V_o I_o = (V_i - V_o) I_o + V_i I_q \quad (2-5)$$

$$Efficiency = \frac{I_o V_o}{(I_o + I_q) V_i} \times 100\% \quad (2-6)$$

6. 负载调整率(Load Regulation)

LDO 线性稳压器的负载调整率即负载调整能力，表示当负载发生变化时，输出电压保持恒定的能力。如图 2-5 所示，随着负载电流加大，输出电压会有所下降，输出电压下降越缓慢说明负载调整能力越高。

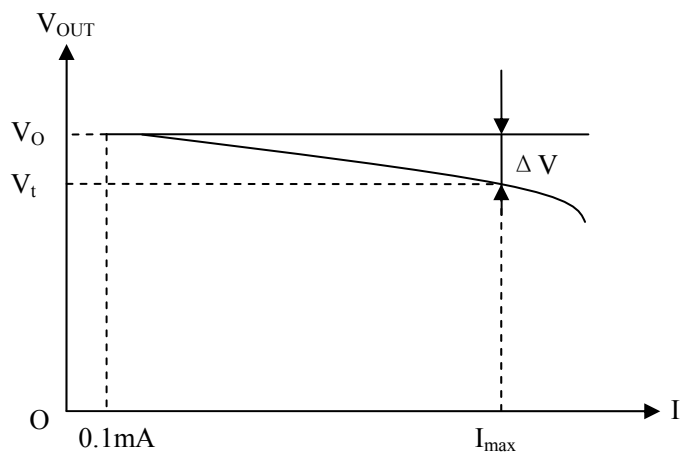


图 2—5 线性稳压器的输出电压和输出电流关系曲线图

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库