

共射放大电路静态工作点漂移抑制与电路结构优化研究

荣阳, 王泽奇, 张家源, 于洪仕

(辽宁工程技术大学, 电子与信息工程学院, 辽宁省兴城市, 125100)

摘要: 静态工作点是共射放大电路的核心参数, 其稳定性直接影响电路的信号放大性能与失真情况。本文阐述了放大电路静态工作点的概念, 分析其对波形失真和电压增益的影响, 指出温度是导致静态工作点偏移的主要因素。针对不同共射放大电路, 研究表明: 基本固定偏置电路结构简单但稳定性差, 仅适用于温度变化小的场景; 电压负反馈和电流负反馈偏置电路通过反馈机制提升稳定性, 但会降低放大倍数; 分压式偏置电路利用电阻分压和发射极电阻的电流负反馈作用稳定工作点, 并联旁路电容可保持交流增益; 温度补偿偏置电路借助热敏元件补偿温度影响, 稳定性高但需严格选配元件。研究为根据实际需求选择合适的共射放大电路偏置方案提供了参考。

关键词: 共射放大电路; 静态工作点; 稳定性; 电路分析。

中图分类号: TN721

Static Operating Point Drift Suppression and Circuit Optimization in Common-Emitter Amplifiers

RongYang, Wang Zeqi, Zhang Jiayuan, YU Hongshi

(Liaoning Technical University, College of Electronics and Information Engineering, Xingcheng City, Liaoning Province, 125100)

Abstract: The static operating point is a core parameter of common-emitter amplifier circuits, with its stability directly influencing signal amplification performance and distortion. This paper elaborates on the concept of the static operating point in amplifier circuits, analyzes its impacts on waveform distortion and voltage gain, and identifies temperature as the primary factor causing static operating point drift. Studies on different common-emitter amplifier circuits show that the basic fixed bias circuit features a simple structure but poor stability, being suitable only for scenarios with minimal temperature changes; voltage and current negative feedback bias circuits enhance stability through feedback mechanisms but reduce the voltage gain; the voltage-divider bias circuit stabilizes the operating point via resistor voltage division and current negative feedback from the emitter resistor, with a parallel bypass capacitor maintaining the AC gain; the temperature compensation bias circuit uses thermal-sensitive components to compensate for temperature effects, offering high stability but requiring strict component selection. This research provides a reference for selecting appropriate biasing schemes for common-emitter amplifier circuits according to practical needs.

Key words: Common-emitter amplifier circuit; Quiescent operating point; Stability; Circuit analysis.

0 引言

在模拟电子技术领域, 共射放大电路因结构简洁、电压放大能力突出, 成为信号处理的基础单元, 其性能直接影响通信、测控等电子系统的可靠性。静态工作点作为电路直流工作状态的核心参数, 不仅决定三极管是否工作在放大区, 还通过影响器件的电流增益、

作者简介: 荣阳 (2004), 男, 学生, 通信工程

通信联系人: 于洪仕 (1980-), 男, 副教授、硕导, 主要研究方向: 检测装置与自动化装置. E-mail: 911446770@qq.com

输入电阻等特性，对电路的电压增益、波形失真度及负载能力产生决定性作用。然而，实际应用中环境温度波动、电源纹波、元件参数漂移等因素普遍存在，其中温度变化对三极管特性的影响最为显著——温度会改变三极管的导通电压、反向饱和电流及电流放大系数，导致集电极电流波动，轻者引发信号失真，重者可能造成器件失效。因此，如何有效抑制静态工作点的偏移，成为提升共射放大电路可靠性的关键技术瓶颈。

现有偏置方案在稳定性优化方面已形成多种技术路径：基本固定偏置电路结构简单但缺乏动态调节机制，仅适用于恒温或低精度场景；负反馈偏置技术通过引入电压或电流反馈抑制工作点漂移，但不可避免地导致放大倍数下降；分压式偏置电路通过电阻分压固定基极电位，结合发射极电阻的负反馈作用实现双端稳定，成为目前应用最广泛的结构；温度补偿技术则利用热敏元件与三极管的特性匹配抵消温漂，在高精度领域表现优异，但需复杂的参数调试。尽管这些技术各有成效，但在稳定性、增益损耗、电路复杂度及成本之间难以兼顾，实际设计中需根据应用场景（如工业宽温环境、消费电子成本限制、医疗仪器精度要求等）进行针对性选择。

本文旨在系统梳理共射放大电路静态工作点的物理内涵与影响机制，对比分析不同偏置方案的稳定性原理、性能差异及适用边界，揭示环境温度、元件参数、电路结构之间的相互作用规律^[1]。通过明确各类电路在抗干扰能力、增益特性、实现成本等维度的优劣，为电子工程师提供从理论分析到工程选型的系统化参考，助力在实际设计中平衡性能需求与实现条件，推动共射放大电路在复杂环境下的可靠应用与优化设计。

1 放大电路静态工作点的基础理论与影响机制

1.1 静态工作点的物理内涵

当放大电路处于无输入信号的直流工作状态时，称为静态。在此状态下，直流电源驱动基极回路与集电极回路形成一组特征直流参数：基极电流（ I_B ）、集电极电流（ I_C ）、基射极电压（ U_{BE} ）和集射极电压（ U_{CE} ）。这些参数在三极管的输入特性曲线和输出特性曲线上对应唯一确定的坐标点，即静态工作点（通常标记为 Q 点），其对应的直流参数分别记为 I_{BQ} 、 I_{CQ} 、 U_{BEQ} 和 U_{CEQ} 。

1.2 静态工作点对电路性能的影响规律

静态工作点的合理设置是放大电路线性工作的必要条件，其位置直接决定电路的信号处理能力：

波形失真控制：若静态工作点偏低，输入信号负半周时三极管易进入截止区，导致输出信号出现顶部削平的截止失真；若静态工作点偏高，正半周时三极管可能进入饱和区，造成输出信号底部失真的饱和失真。

增益特性影响：静态工作点通过改变三极管的动态参数（如电流放大系数 β 、输入电阻 r_{be} 等），对电路的电压增益产生显著影响。例如，工作点偏移可能导致 β 值偏离线性工作区间，进而引起增益波动或非线性失真。

环境干扰因素分析：静态工作点的稳定性受多因素影响，包括电源电压波动、偏置电阻

80

阻值漂移、元件老化及三极管更换等。其中，**温度变化**是最主要的干扰源——温度通过改变三极管的反向饱和电流（ I_{CBO} ）、基射极电压（ U_{BE} ）和电流放大系数（ β ），形成正反馈机制加剧集电极电流（ I_C ）的波动。实验数据表明，温度每升高 1°C ，硅管的 U_{BE} 约减小 2.5mV ， β 值平均增加 $0.5\%\sim 1\%$ ，而 I_{CBO} 则呈指数级增长。

因此，为确保放大电路在目标频段内实现无失真放大并保持稳定增益，必须通过合理的偏置电路设计，构建对温度及其他干扰因素具有鲁棒性的静态工作点稳定机制。

2 固定偏置放大电路的稳定性特性

85

2.1 基础框架与工作原理

基本固定偏置放大电路的拓扑结构如图 1 所示，其核心由耦合电容 C_1/C_2 、基极电阻 R_b 和电源 U_{CC} 构成。该电路通过 R_b 为三极管提供固定基极电流，静态工作点计算公式为：

$$I_{BQ} = \frac{U_{CC} - U_{BEQ}}{R_b} \tag{1}$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} \tag{2}$$

$$U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ}R_C \tag{3}$$

90

当电源电压与电阻参数确定后，工作点在三极管输出特性曲线上的位置随之固定，因此得名“固定偏置”。这一结构的理论优势在于元件数量少、调试简便，适用于对电路复杂度要求极低的场景。

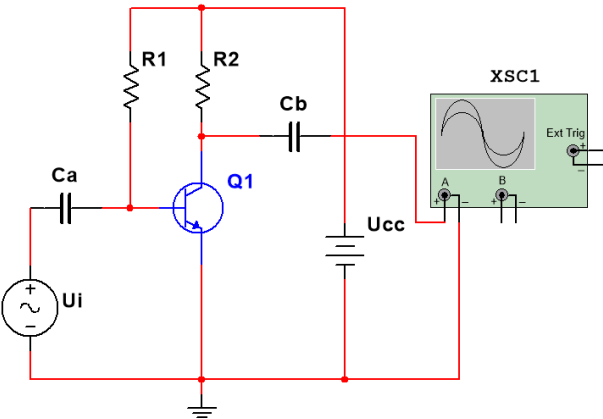


图 1 基本固定偏置放大电路的拓扑结构图

Fig. 1 Topological Structure Diagram of Basic Fixed Bias Amplifier Circuit

温度对三极管参数及工作状态影响显著^[2]。当温度升高时，三极管的 U_{BE} （基极 - 发射极电压）下降， I_{CBO} （集电极 - 基极反向饱和电流）和 β （电流放大系数）上升，这三者的协同变化会导致 I_{CQ} （集电极静态电流）显著增大。实验数据显示，温度每升高，硅管的 I_{CQ} 可能增加 50%~100%，使得工作点向饱和区移动，进而引发输出信号底部失真的问题。这种温度敏感性是三极管电路设计中需重点考虑的因素，通常需通过偏置电路优化等方式抑制参数漂移，以保证电路稳定工作^[3]。

2.2 电压负反馈改进方案

为抑制温度漂移，将基极电阻改接至集电极形成电压负反馈结构（图 2），其闭环调节机制可通过反馈理论建模分析。反馈系数的计算公式为：

$$F = \frac{R_b}{R_b + r_{be}} \quad (4)$$

基极电流计算公式为：

$$I_{BQ} = \frac{U_{CEQ} - U_{BEQ}}{R_b} = \frac{U_{CC} - I_{CQ}R_C - U_{BEQ}}{R_b} \quad (5)$$

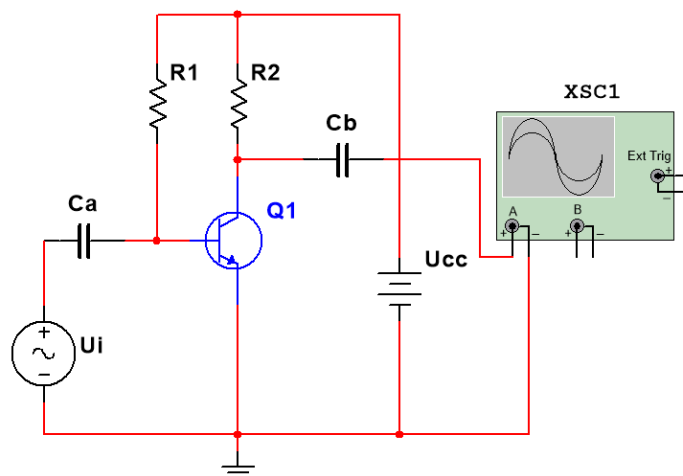


图 2 电压负反馈结构图

Fig. 2 Structural Diagram of Voltage Negative Feedback

当温度变化引起 I_{CQ} 扰动时，反馈网络通过以下路径抑制偏差：温度升高使 I_C 增大时，集电极电压 U_{CE} 下降，反馈至基极使 I_B 减小，抑制 I_C 增长。通过集电极电压对基极电流的反向调节，形成闭环负反馈，抑制 I_{CQ} 波动。如表 1：

表 1 性能参数对比表

115

Tab. 1 Performance Parameter Comparison Table

指标	基本固定偏置	电压负反馈偏置	提升幅度
温度系数	+ 3 % / °C	+ 0.8 % / °C	3.75 倍
电压增益	- 100	- 50	下降 50 %
失真度 (1kHz)	5 %	2 %	改善 60 %

通过表一可以观察到反馈强度依赖 R_b 与 R_c 比值, 当 $RC<1\text{ k}\Omega$ 时, 反馈电压幅度不足, 稳定性提升效果衰减。

2.3 电流负反馈优化设计

120

在发射极串联电阻 R_e 构成电流负反馈电路（图 3），该结构直接以电流作为反馈量，对 I_{CQ} 的稳定精度高于电压反馈。通过检测发射极电流实现调节： I_E 增大时， R_e 压降升高导致 U_{BE} 减小，迫使 I_B 降低。

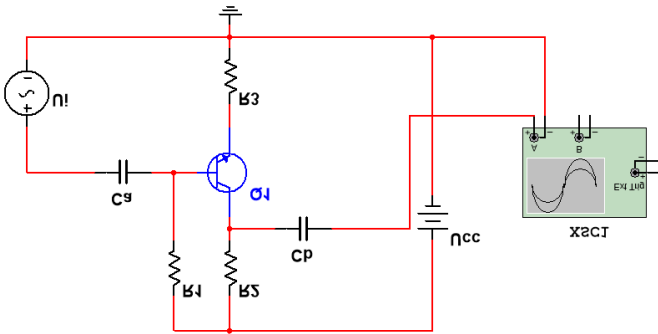


图 3 电压负反馈电路图

125

Fig. 3 Circuit Diagram of Voltage Negative Feedback

相较于电压负反馈，电流负反馈在 R_c 动态变化场景（如音频功率放大）中表现出更优的稳定性，但其增益损耗需通过后续放大级补偿。

2.4 分压式偏置放大电路的稳定性优化机制

130

分压式偏置电路通过 R_{b1}/R_{b2} 分压网络固定基极电位（图 4），结合发射极电阻形成双重稳定机制^[4]，其计算公式为：

$$U_B \approx \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} U_{CC}$$

(6)

通过合理选取 R_{b1} 和 R_{b2} 的阻值, 可使 U_B 仅由分压网络决定, 与三极管参数及温度变化无关, 为静态工作点的稳定提供基准电压^[5]。

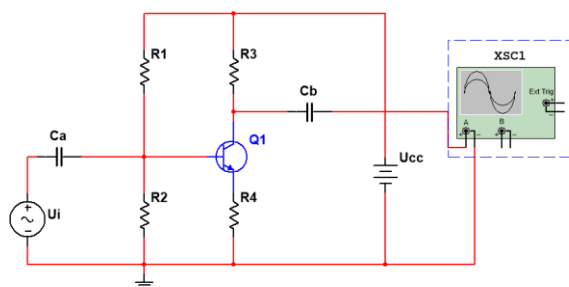


图 4 分压式偏置放大电路图

Fig. 4 Circuit Diagram of Voltage - Divider Biasing Amplifier Circuit

在工程设计中，静态工作点（Q 点）的稳定性可通过基极偏置电流 I_1 与三极管基极电流 I_{BQ} 的配比实现，硅三极管通常取 $I_1=(5\sim 10)I_{BQ}$ 。此时，基极电压 U_B 由电阻 R_{b1} 和 R_{b2} 分压确定。公式（6）表明 U_B 仅与电阻分压相关，不受温度影响。当温度升高时，三极管集电极电流 I_{CQ} （约等于发射极电流 I_{EQ} ）增大，发射极电阻 R_e 压降 $I_{EQ}R_e$ 随之上升。由于 $U_{BEQ}=U_B-I_{EQ}R_e$ 且 U_B 恒定， U_{BEQ} 减小会导致 I_{BQ} 降低，进而抑制 I_{CQ} 增长，通过 R_e 的电流负反馈实现工作点稳定。 R_e 阻值越大，负反馈作用越强，稳定性越高。

发射极电阻 R_e 的引入会降低电压放大倍数，且阻值越大增益衰减越显著。为平衡稳定性与增益，可在 R_e 两端并联旁路电容 C_e （如图 4 (b) 所示）。利用电容“隔直通交”特性， C_e 可保留 R_e 的直流负反馈功能，同时消除其对交流信号的衰减，确保静态工作点稳定的同时维持电压放大能力。

3 温度补偿偏置电路

温度补偿偏置电路通过引入热敏元件，利用其与三极管参数的温度特性匹配机制，实现静态工作点温漂的主动抑制^[6]，主要分为热敏电阻补偿和二极管补偿两类技术方案：

3.1 热敏电阻补偿电路

该电路采用负温度系数（NTC）热敏电阻作为核心补偿元件，其阻值随温度升高呈指数下降特性，其计算公式为：（如 $R_T=R_{T0}B(1/T-1/T_0)$ ， B 为材料常数）。

设计时需通过参数匹配，使热敏电阻阻值变化对基极电流的调节作用，恰好抵消温度对三极管集电极电流的影响。例如，当温度升高导致三极管 I_C 增大时，热敏电阻阻值下降，基极偏置电流相应增大，从而抑制 I_C 的增长趋势。通过精确选取热敏电阻的初始阻值与温度系数，可在宽温范围内将 I_C 波动控制在 $\pm 2\%$ 以内。

3.2 二极管补偿电路

根据三极管类型的不同，采用差异化补偿策略：

硅管应用（正向偏置补偿）：硅管的发射结电压 U_{BE} 具有约 $-2.5\text{mV}/^\circ\text{C}$ 的温度系数，可在基极偏流支路上串联同类型硅二极管（如 1N4148）。由于二极管与三极管的 U_{BE} 温度特性一致，温度变化时两者的电压漂移相互抵消，从而稳定 U_{BEQ} 。

锗管应用（反向偏置补偿）：锗管的反向穿透电流 I_{CBO} 随温度呈指数增长（约每 10°C 翻倍），需在基极回路串联反向偏置的肖特基二极管，利用其反向漏电流的温度特性（约 $+0.1\%/^{\circ}\text{C}$ ）补偿 I_{CBO} 的增长，抑制集电极电流的温漂。

3.3 技术特点与应用场景

165 温度补偿电路的显著优势在于静态工作点稳定性极高，尤其适用于医疗仪器、航空电子等对温漂敏感的精密场景。然而，其依赖元件参数的精确匹配，需通过实验筛选热敏电阻或二极管，且布局时需确保补偿元件与三极管的温度一致性（如通过导热胶固定），导致电路复杂度和调试成本显著高于负反馈结构。因此，该技术主要用于常规负反馈无法满足稳定性要求的极端环境，而非通用放大电路设计。

170 4 不同偏置电路的稳定性与适用场景存在显著差异

在模拟电子电路设计中，偏置电路的选择直接影响晶体管工作点的稳定性与放大性能。根据不同应用场景的需求，常见偏置电路可分为多种类型，其结构特点与适用范围差异显著。以下从基本结构出发，逐步分析各类偏置电路的工作原理、性能优劣及典型应用场景，并对其核心特性进行对比总结^[7]。如表 2。

175 **基本固定偏置电路：**结构简单但稳定性差，仅适用于温度恒定、精度要求低的简易场景（如临时测试电路）。

负反馈偏置电路：

电压负反馈：通过集电极电压反馈调节工作点，稳定性优于基本结构，但增益损失明显，适用于对稳定性要求中等的通用放大场景。

180 电流负反馈：利用发射极电阻的电流采样实现强反馈，稳定性更高，需并联旁路电容保留交流增益，广泛应用于工业控制、传感器前置放大等场景。

分压式偏置电路：通过电阻分压与电流负反馈的双重机制，在宽温环境下实现高效稳定，且通过旁路电容可消除对交流增益的影响，是主流应用的优选方案（如音频放大、通用信号处理）。

185 **温度补偿偏置电路：**借助热敏电阻或二极管的特性匹配抵消温漂，稳定性极高但调试复杂，适用于医疗设备、航空电子等对精度要求苛刻的特殊领域。

表 2 总结分析表

Tab. 2 Conolusion Analysis Sheet				
电路类型	稳定性	增益影响	复杂度	典型应用
基本固定偏置	低	无	简单	恒温，低精度电路
电压 / 电流负反馈	中	中等下等	中等	工业控制、通用放大
分压式偏置	高	可消除影响	中等	宽温环境、主流应用
温度补偿偏置	极高	无	复杂	精密仪器、航空电子

190 5 结论

本文系统分析了共射放大电路静态工作点的定义、对电路性能的影响及温度等干扰因素，对比了基本固定偏置、负反馈偏置（电压 / 电流）、分压式偏置和温度补偿偏置等电路的稳定性机制与性能特点，指出基本固定偏置仅适用于低精度场景，负反馈偏置通过反馈机制提升稳定性但存在增益损耗，分压式偏置利用分压网络与电流负反馈实现高效稳定成为主流方案，温度补偿偏置则通过热敏元件匹配实现高精度但调试复杂；强调工程设计需根据环境温度、增益需求和成本限制权衡选择，为共射放大电路在不同场景下的合理应用提供了理论依据与选型参考。

[参考文献] (References)

- 200 [1]李博士,谷雯,尹文杰,等.电压负反馈的设计与实现[J].电子制作,2023,31(18):16-19.
- [2]于红兵,邹天乐.电流串联负反馈网络的完整作用机制新解[J].高师理科学刊,2023,43(07):84-88.
- [3]许峰川,邹丽新,吕清松.三极管多级放大电路动态参数详解[J].教育教学论坛,2020,(23):337-339.
- [4]吴瑞.电阻分压式偏置放大电路元器件性能研究[J].电子世界,2019,(14):51-52.
- [5]张静秋.静态工作点对放大电路性能指标的影响[J].电子制作,2017,(11):61-64+56.
- 205 [6]王翔.电压温度对三极管 PN 结线性特性测量的影响[J].咸阳师范学院学报,2012,27(06):27-29.
- [7]宋琦明,陈志恒,李文渊.CMOS 放大器的温度补偿偏置[J].微电子技术,2003,(06):16-18.