

# 高性能晶体管直流稳压电源

曾 大 鑫 著

水利电力出版社

## 内 容 提 要

本书介绍线性调整型高性能晶体管直流稳压电源的理论计算、设计方法和实用电路。

第一章介绍几种基本稳压电路的理论计算公式和方法。第二章介绍稳压电路基本部件的设计和计算。第三章介绍稳压电源的整机设计和调试方法,以及一些实用电路。每章均列举了大量具体电路和实际设计方法,有助于读者掌握各种稳压电路的设计和计算方法。

本书可供从事电子设备和电源设计的工程技术人员和大中专电类有关专业的师生阅读和参考。

## 高性能晶体管直流稳压电源

曾 大 鑫 著

\*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 32开本 5.5印张 120千字

1984年9月第一版 1984年9月北京第一次印刷

印数 00001—13210册 定价 0.60元

书号 15143·5453

## 前 言

直流稳压电源是电子设备的能源部件，其性能良好与否直接影响整个设备的精度、稳定性和可靠性。随着电子设备向高精度、高稳定性和高可靠性的方向发展，对设备的能源部件亦相应地提出了更高的要求。为此，设计与研制高性能的直流稳压电源成为一项重要的课题，并对电子设备的发展产生重要作用。

关于线性调整型稳压电路的理论计算，一般书刊上给出的计算公式是在忽略了一些参数的影响下得出的近似计算式，它对某些电路型式，特别是高性能的电路型式带来的误差较大。为了解决设计工作中合理分配稳压电路中各个基本部件的指标以提高经济效益，在实用电路的研制中如何提高稳压性能，以及在生产和调试工作中如何制定合理的工艺措施，有必要对稳压电路的理论计算作进一步的分析研究。

本书内容安排上力求将理论计算与实用电路的研制结合得比较好些。第一章主要介绍几种常用的高性能直流稳压电源的理论计算方法，提出较为严密的理论计算公式，分析稳压电源的整机技术指标与电路型式以及各部件参数之间的关系。第二章主要介绍稳压电源基本部件的具体电路及其参数的计算方法。知道了各部件的参数后，将其代入第一章中的有关计算公式，便可求出整机的技术指标。第三章是在前两章的基础上，进一步分析整机设计中的问题，并给出了几种高性能稳压电源的实用电路。

限于作者水平，书中不妥和错误之处，在所难免，热忱期望读者赐教。

本书承北京无线电技术研究所陈恒庆同志以及清华大学电子学教研室张乃国同志审阅，并对原稿提出了许多宝贵意见与建议，谨在此致以衷心感谢。

作 者

一九八三年七月

于水利电力部西安热工研究所

# 目 录

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 第一章 稳压电路的理论计算 .....                                                                            | 1  |
| 第一节 稳压电源的技术指标 .....                                                                            | 1  |
| 一、特性指标(1)    二、质量指标(2)                                                                         |    |
| 第二节 稳压原理 .....                                                                                 | 4  |
| 一、稳压过程(6)    二、输出电压 $V_0$ 的计算(7)                                                               |    |
| 第三节 基本型稳压电路的理论计算 .....                                                                         | 8  |
| 一、基本电路(8)    二、电路方程式(12)    三、理论计算<br>公式(14)    四、计算举例(18)                                     |    |
| 第四节 辅助电源型稳压电路的理论计算 .....                                                                       | 23 |
| 一、基本电路(23)    二、理论计算公式(25)    三、计算举例(26)                                                       |    |
| 第五节 恒流源负载型稳压电路的理论计算 .....                                                                      | 30 |
| 一、基本电路(30)    二、恒流二极管的特性与参数(32)<br>三、理论计算公式(34)    四、计算举例(35)    五、恒流源负载<br>型与辅助电源型稳压电路的比较(37) |    |
| 第六节 浮地型零伏起调稳压电路的理论计算 .....                                                                     | 40 |
| 一、基本电路(40)    二、理论计算公式(47)    三、计算举例(50)                                                       |    |
| 第七节 集电极输出型稳压电路的理论计算 .....                                                                      | 54 |
| 一、基本电路(54)    二、理论计算与实用电路举例(56)                                                                |    |
| 第八节 线性调整型高性能稳压电源的分类与性能比较 .....                                                                 | 60 |
| 一、分类(60)    二、性能比较(61)                                                                         |    |
| 第二章 稳压电源基本部件的设计与计算 .....                                                                       | 63 |
| 第一节 基准电压和取样电路的设计与计算 .....                                                                      | 63 |
| 一、稳压管的伏安特性和主要参数(63)    二、基准电压电路的<br>设计与计算(68)    三、取样电路的设计与计算(73)                              |    |
| 第二节 误差放大器的设计与计算 .....                                                                          | 75 |

- 一、误差放大器温度漂移的计算公式(75)
- 二、单级误差放大器的设计与计算(81)
- 三、采用稳压管作级间耦合的多级放大器的设计与计算(83)
- 四、采用恒流管作级间耦合的多级放大器的设计与计算(87)
- 五、集成运算放大器(90)

### 第三节 保护电路的设计与计算 .....92

- 一、限流型保护电路的设计与计算(94)
- 二、减流型保护电路的设计与计算(96)
- 三、截流型保护电路的设计与计算(102)
- 四、过电压保护电路的设计与计算(105)
- 五、过热保护电路的设计与计算(108)

### 第四节 调整级的设计与计算 .....110

- 一、调整级等效参数的计算(110)
- 二、减小调整管最小压降的方法(113)
- 三、调整管的散热设计(115)
- 四、调整级的设计(124)

## 第三章 稳压电源的整机设计、调试方法和实用电路 .....127

### 第一节 整机设计 .....127

- 一、设计步骤和设计举例(127)
- 二、启动过程与启动条件(139)
- 三、远距离供电的传输方法(143)
- 四、改善波纹电压的措施(146)

### 第二节 稳压电源的调试步骤与性能测试方法 .....149

- 一、调试步骤(149)
- 二、性能测试方法(152)

### 第三节 高性能直流稳压电源的实用电路 .....155

- 一、2~9V输出的典型电路(155)
- 二、9~48V输出的典型电路(158)
- 三、输出电压从零伏起调直流稳压电源的典型电路(163)
- 四、新型高效率直流稳压电源的典型电路(165)

# 第一章 稳压电路的理论计算

本章在简要介绍直流稳压电源的技术指标和稳压原理后，将着重介绍线性调整型直流稳压电源的几种基本电路的理论计算方法。我们准备依次介绍基本型、辅助电源型、恒流源负载型、浮地型（输出电压可以从零伏起调）、集电极输出型（高效率）等几种基本电路的理论计算方法。为便于读者掌握理论计算公式的实际运用能力，每种电路均附有实用电路的计算例子。最后还对线性调整型直流稳压电源的分类和性能比较作了简要介绍。

## 第一节 稳压电源的技术指标

### 一、特性指标

1. 最大输出电流：它取决于主调整管的最大允许耗散功率和最大允许工作电流。

2. 输出电压和电压调节范围：这可根据使用对象的要求来确定。对于整机配套的电源，调节范围最好小一些，其电压值一旦调好后就不再变更。对于作试验研究用的电源，其输出电压大多是从零伏到某一数值连续可调的。

3. 保护特性：在串联调整型稳压电源中，当负载电流过载或输出短路时，调整管瞬间即遭损坏，因此采用快速响应的过电流保护电路是必要的。此外，为了防止某些负载元件因电压过高而损坏，还要求稳压电源具有过电压保护的功

能。在某些场合还对调整管设置过热保护。

4.效率：对于串联调整型稳压电源来说，提高效率的主要途径是设法减小调整管上的电压降。提高效率不仅能够节能，而且可以降低整机的温升、延长电源的使用寿命和提高电源的可靠性。减小电源的体积和重量。

5.工作温度：这可根据使用场所的环境温度和机器的类别来确定，并根据此项指标来选择电路的元器件和进行散热设计。

6.过冲幅度：由于某一影响量瞬变而引起输出电压超出稳压区称为过冲。过冲幅度是指在瞬变过程中，输出电压偏离额定值的最大幅度，用符号A表示。由于稳压电路中存在储能元件，因此当给电路施加某种形式的激励时（例如交流供电电源阶跃变化、负载阶跃变化），便会引起电路产生瞬变过程。输出电压过冲便是它的表现形式之一。若过冲幅度太大，将造成某些负载（例如MOS组件、微处理机片子）工作不正常，甚至损坏。对于这类负载，过冲幅度是一项重要指标。按照常见的阶跃方式，过冲幅度分为：（1）交流供电电源阶跃变化时的过冲幅度，是指交流供电电源在额定值 $220V \pm 10\%$ 阶跃变化时，输出电压偏离额定值的最大幅度；（2）负载阶跃变化时的过冲幅度，是指负载电流从空载到满载之间阶跃变化时，输出电压偏离额定值的最大幅度。

## 二、质量指标

质量指标有多种提法。本书采用我国电子工业部部标《电子设备用低压直流稳压电源基本参数要求及测量方法（SJ1501-79）》的规定。

1.电压稳定性：这是指在所有其它影响量（指来自电源



外部可以影响其性能的任何量) 保持不变以及输出电流为额定值 $I_{0. n}$ 时, 由于供电电源电压在额定值 $220V \pm 10\%$  范围内变化所引起的输出电压的相对变化量(取绝对值)。电压稳定度的符号为 $S_v$ 。由于整流滤波电路的电动势 $E_i$ 与 交流供电电源电压成正比, 所以供电电源电压变化 $10\%$ 时, 整流滤波电路的电动势 $E_i$ 亦相应变化 $10\%$ , 即  $\Delta E_i = 10\% E_i$ 。由定义可知,  $S_v$ 的表达式如下:

$$S_v = \frac{\Delta V_0}{V_0} \bigg|_{\Delta E_i = 10\% E_i}$$

根据稳压电路各变化量之间的电路方程式, 可以求出输出电压的增量 $\Delta V_0$ 对输入电压(即整流滤波电路的电动势  $E_i$ ) 的增量 $\Delta E_i$ 之间的计算公式。 $\Delta V_0$ 与 $\Delta E_i$ 的比值称为稳定系数  $S$ , 即

$$S = \frac{\Delta V_0}{\Delta E_i}$$

将上述两个式子联立求解, 可得到便于进行工程计算的表达式:

$$S_v = S \frac{10\% \times E_i}{V_0} \quad (1-1)$$

2. 波纹电压: 这是指在额定工作的情况下, 输出电压中的交流分量。波纹电压有效值的符号为 $V_r$ , 峰-峰值的符号为 $V_{r.p-p}$ 。输出电压中的交流分量主要来源于输入电压 中的交流分量 $V_{ir}$ 。 $V_{ir}$ 可以看作是输入电压的变化量。很明显, 稳压电路对这种变动量也将起抑制作用。所以, 输出电压中的波纹电压 $V_r$ 可以近似用输入电压的波纹电压  $V_{ir}$  和稳定系数  $S$  的乘积来表示, 即

$$V_r \approx S V_{ir} \quad (1-2)$$

此外, 波纹电压还与稳压电路的内部噪声以及外部电磁

干扰有关，它不是正弦波或锯齿波，所以 $V_{r.p-p}$ 及 $V_r$ 应分别列出。

3. 负载稳定度：这是指在所有其它影响量保持不变时，由于负载的变化使输出电流在额定值 $I_{0.n}$ 和零之间变化时所引起的输出电压的相对变化量。负载稳定度的符号为 $S_I$ 。由定义可知

$$S_I = - \frac{\Delta V_0}{V_0} \bigg|_{\Delta I_0 - I_{0.n}}$$

根据稳压电路各变化量之间的电路方程式，可以求出输出电压的增量 $\Delta V_0$ 对输出电流的增量 $\Delta I_0$ 之间的计算公式，故将上式改写为

$$S_I = - \frac{\Delta V_0}{\Delta I_0} \cdot \frac{\Delta I_0}{V_0} \bigg|_{\Delta I_0 - I_{0.n}} = R_0 \frac{I_{0.n}}{V_0} \quad (1-3)$$

式中： $R_0 = -\Delta V_0 / \Delta I_0$ ，称为稳压电源的内阻。 $I_{0.n}$ 为输出电流的额定值。

4. 温度系数：这是指在所有其它影响量保持不变以及在额定工作的情况下，由于环境温度变化所引起的输出电压的相对变化量。温度系数的符号为 $\alpha$ 。由定义可知

$$\alpha = \frac{\Delta V_0}{\Delta T} \cdot \frac{1}{V_0} = \alpha_T \frac{1}{V_0} \quad (1-4)$$

式中： $\alpha_T = \Delta V_0 / \Delta T$ ，称为稳压电源的温度漂移。

## 第二节 稳压原理

图1-1是用来说明线性调整型晶体管直流稳压电源工作原理的一种基本稳压电路。图中： $E_L$ 是整流滤波电路的电动势， $R_L$ 是整流滤波电路的等效内阻， $V_i$ 是未经稳定的输入电压， $V_0$ 是输出的稳定电压， $I_0$ 是输出电流， $R_L$ 是外负载，



基准电压  $V_{Z1}$  进行比较并对其差值进行放大的作用，所以称为误差放大器。 $V_{b2}$  和  $V_{Z1}$  的差值  $V_{AB}$  称为误差电压， $V_{AB} = V_{b2} - V_{Z1}$ 。 $R_c$  是误差放大器的负载电阻。从  $BG_2$  输出的控制电流  $I_{c2}$  加到调整管  $BG_1$  的基极。 $I_{c2}$  用来控制  $BG_1$  的基极电流  $I_{b1}$ ，达到维持输出电压近似不变的调整作用。

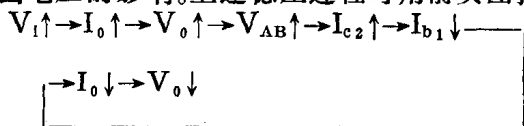
### 一、稳压过程

1. 外负载  $R_L$  不变，输入电压  $V_i$  变化时的稳压过程：

由于  $R_L$  固定不变，所以输出电压的变化量  $\Delta V_o$  等于输出电流的变化量  $\Delta I_o$  乘以负载电阻  $R_L$ ，即  $\Delta V_o = \Delta I_o R_L$ 。输入电压  $V_i$  的变化，是通过两个途径来影响输出电流  $I_o$  的。其一是  $V_i$  的变化通过误差放大器的负载电阻  $R_c$ ，使流过其中的电流  $I_R$  随之变化； $I_R$  的变化送至调整管  $BG_1$  的基极，引起输出电流  $I_o$  的变化。其二是  $V_i$  的变化通过调整管  $BG_1$  的集电极至发射极的动态内阻  $r_{ce1}$ ，使流过其中的电流  $I_{ce1}$  随之变化； $I_{ce1}$  的变化直接引起输出电流  $I_o$  的变化。上述两个途径是引起输出电压变化的根源。而负反馈的调整作用就在于抵消这种变化，使输出电压维持近似不变，其调整过程如下：

如输入电压  $V_i$  增加， $V_i$  通过  $R_c$  和  $r_{ce1}$  使输出电流  $I_o$  有增加的趋势，而使  $V_o$  升高。 $V_o$  升高通过取样电路使取样电压  $V_{b2}$  相应升高。由于  $BG_2$  发射极电位被稳压管  $D_{Z1}$  稳住而基本不变，所以加到  $BG_2$  输入端的误差电压  $V_{AB}$  随之增加。 $V_{AB}$  的增加使  $BG_2$  的集电极电流  $I_{c2}$  随之增加。由于调整管  $BG_1$  的基极电流  $I_{b1}$  为流过误差放大器负载电流  $I_R$  和流过  $BG_2$  集电极电流  $I_{c2}$  之差，即  $I_{b1} = I_R - I_{c2}$ ，所以  $I_{c2}$  的增加导致  $I_{b1}$  的减小。 $I_{b1}$  的减小使  $BG_1$  的发射极电流随之减小，于是输出电流  $I_o$  被拉回到原来的数值附近，从而使输出电压  $V_o$  维持近似不变。这里，误差放大器输出的控制电流  $I_{c2}$  起着抵消  $I_R$  和

$I_{ce1}$ 对输出电压的影响。上述稳压过程可用箭头图描述如下：



根据同样的道理，当 $V_1$ 减小时，由于输出电流有减小的趋势而使 $V_0$ 下降。通过负反馈的作用使 $I_{b1}$ 增加， $I_{b1}$ 增加使输出电流被拉回到原来的数值附近，从而使输出电压 $V_0$ 维持近似不变。

2. 输入电源电压不变而负载电阻 $R_L$ 变化时的稳压过程：

当负载电阻 $R_L$ 变化时，将引起输出电流相应的变化。由于稳压电源有一定的内阻，当输出电流变化时，输出电压亦随之变化。输出电压的变化通过负反馈的作用使 $I_{b1}$ 随之变化， $I_{b1}$ 经 $BG_1$ 放大后提供负载所需要的电流变化量。由于 $BG_1$ 和 $BG_2$ 的放大作用，仅仅需要输出电压很小的变化量便能满足负载电流很大的变化量。换句话说，负载电流在大范围变动时引起输出电压的变化是很小的。

## 二、输出电压 $V_0$ 的计算

由图 1-1 知，在稳压电路进入稳态工作后，其取样电压 $V_{b2}$ 等于基准电压 $V_{Z1}$ 和误差电压 $V_{AB}$ 之和，即

$$V_{b2} = V_{Z1} + V_{AB}$$

当 $I_s \gg I_{b2}$ 时，

$$V_{b2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_0$$

所以有

$$V_0 = \frac{R_1 + R_2}{R_2} (V_{Z1} + V_{AB}) \quad (1-5)$$

令  $n = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$  ( $n$ 称为取样系数)

$$V_o = \frac{1}{n}(V_{z1} + V_{AB}) \quad (1-6)$$

由式(1-6)知:输出电压  $V_o$  取决于基准电压  $V_{z1}$ 、误差电压  $V_{AB}$  和取样系数  $n$ 。不论是输入电压  $V_i$  变化或是输出电流  $I_o$  变化, 还是环境温度  $T$  变化, 由于基准电压  $V_{z1}$ 、取样系数  $n$  以及误差电压  $V_{AB}$  都只有微小的变化, 所以输出电压  $V_o$  总是维持近似不变, 而且在改变取样电阻时, 可以调节  $V_o$  的大小。

应当指出, 这种线性调整型稳压电源只能做到输出电压近似不变。这是因为, 负反馈的调整作用是靠输出电压与基准电压的静态误差来维持的。如果输出电压绝对不变, 那末调整作用就无法维持, 输出电压也就不可能进行自动调节。所以从本质上说, 稳压电路是一种带有基准值的反馈控制电路, 属于有差调节系统。

从以上对稳压原理的分析可知, 稳压电源之所以能维持输出电压近似不变, 关键在于用输出电压微小的变化量返回去控制调整管的基极电流, 来实现动态平衡的。调整管的基极电流是由误差放大器输出电流  $I_{e2}$  来进行控制的。因此, 要提高稳压电路的控制精度, 关键之一是设计高增益的误差放大器。误差放大器的增益越高, 则输出同样的控制电流所需要的误差电压  $V_{AB}$  的变化量越小。由式(1-6)知,  $V_{AB}$  的变化量越小, 则输出电压  $V_o$  的变化量也越小。

### 第三节 基本型稳压电路的理论计算

#### 一、基本电路

误差放大器的负载为纯电阻, 主调整管为发射极输出的

计算稳压电路的性能与一般晶体管电路一样，先建立它的等效电路，然后列出电路方程式，进而推导出电路性能的计算公式。稳压电路在一定的调节范围内晶体管的参数近似不变，因而可以把稳压电路等效成一个线性调节系统。为了得到通用的理论计算公式，我们将调整级等效为一个晶体管BG，将误差放大器等效为一个具有互导G的放大环节，于是便可得到基本型稳压电路的通用电路形式，如图1-2所示。

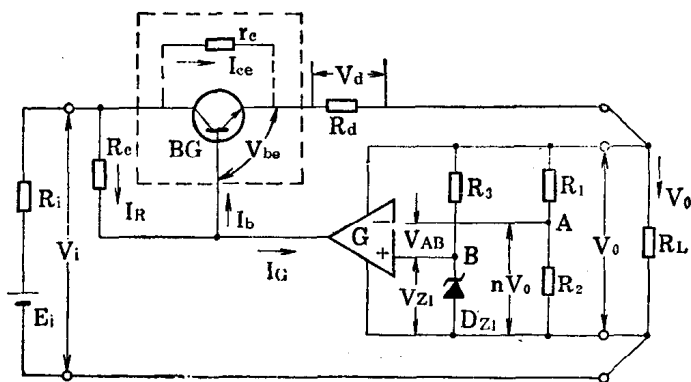


图 1-2 基本型稳压电源的通用电路

调整级的主要参数是电流放大系数  $\beta$ 、集电极至发射极的动态内阻  $r_c$  以及输入电阻  $r_i$ 。 $\beta$  等于复合连接的几个管子电流放大系数的乘积。 $r_c$  等于集电极至发射极电压增量  $\Delta V_{ce}$  与电流增量  $\Delta I_{ce}$  之比，即

$$r_c = \frac{\Delta V_{ce}}{\Delta I_{ce}} \approx -\frac{\Delta V_i}{\Delta I_{ce}} \quad (1-7)$$

$r_i$  等于发射结电压增量  $\Delta V_{be}$  与基极电流增量  $\Delta I_b$  之比，即

$$r_i = \frac{\Delta V_{be}}{\Delta I_b} \quad (1-8)$$

只要知道在给定工作电流下复合连接几个晶体管的电流放大系数和动态内阻，便可求出调整级的  $\beta$ 、 $r_c$  和  $r_i$ 。举例来说，调整级由三个晶体管  $BG_1$ 、 $BG_2$ 、 $BG_3$  复合连接组成，如图1-3所示。已知  $BG_1$  的电流放大系数为  $\beta_1$ ，动态内阻为

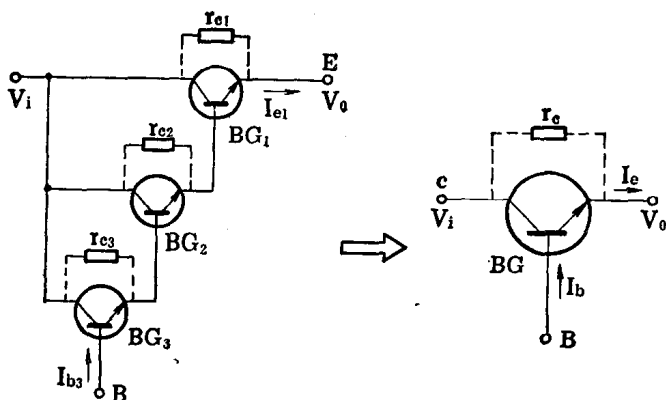


图 1-3 由三个晶体管复合连接的调整级

$r_{c1}$ ； $BG_2$  的电流放大系数为  $\beta_2$ ，动态内阻为  $r_{c2}$ ； $BG_3$  的电流放大系数为  $\beta_3$ ，动态内阻为  $r_{c3}$ 。调整级的电流总增益



$\beta$  为:

$$\begin{aligned}\beta &= \frac{\Delta I_{e1}}{\Delta I_{b3}} = \frac{\Delta I_{e1}}{\Delta I_{b1}} \cdot \frac{\Delta I_{b1}}{\Delta I_{b2}} \cdot \frac{\Delta I_{b2}}{\Delta I_{b3}} \\ &= \frac{\Delta I_{e1}}{\Delta I_{b1}} \cdot \frac{\Delta I_{e2}}{\Delta I_{b2}} \cdot \frac{\Delta I_{e3}}{\Delta I_{b3}} \\ &= (1 + \beta_1)(1 + \beta_2)(1 + \beta_3) \approx \beta_1 \beta_2 \beta_3 \quad (1-9)\end{aligned}$$

调整级的动态内阻  $r_c$  为

$$\begin{aligned}r_c &\approx \frac{\Delta V_1}{\Delta I_{ce}} = \frac{\Delta V_1}{\frac{\Delta V_1}{r_{c1}} + \beta_1 \frac{\Delta V_1}{r_{c2}} + \beta_1 \beta_2 \frac{\Delta V_1}{r_{c3}}} \\ &= \frac{r_{c1} r_{c2} r_{c3}}{r_{c2} r_{c3} + \beta_1 r_{c1} r_{c3} + \beta_1 \beta_2 r_{c1} r_{c2}} \quad (1-10)\end{aligned}$$

调整级的输入电阻的计算公式可由晶体管T型等效电路求出。对单个管子来说,其输入电阻  $r_i$  的计算公式为

$$r_{be} = r_b + (1 + \beta)r_e \approx r_b + \beta r_e$$

式中:  $r_b$  为管子的基区电阻。对于在低频工作下的小功率管来说,基区电阻约为  $300\Omega$ ; 对于硅大功率管来说,基区电阻约为数欧。

$r_e$  为管子的发射结电阻。由固体物理学关于PN结的研究可知,  $r_e$  与发射极静态电流  $I_e$  有如下关系:

$$r_e = \frac{26[mV]}{I_e[mA]} \quad (1-11)$$

当调整级由三个管子复合连接组成时,其输入电阻的计算公式为

$$\begin{aligned}r_i &= r_{be3} + \beta_3[r_{e3} + r_{b2} + \beta_2(r_{be2} + r_{b1} + \beta_1 r_{e1})] \\ &= r_{be3} + \beta_3 r_{be2} + \beta_3 \beta_2 r_{be1} \quad (1-12)\end{aligned}$$

式中:  $r_{be1}$ 、 $r_{be2}$ 、 $r_{be3}$  分别为  $BG_1$ 、 $BG_2$ 、 $BG_3$  管的输入电阻。