

高性能直流稳定电源

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直流稳定电源的理论计算、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。第三章介绍稳定电源的整机设计和调试方法以及一些实用电路。第四章介绍集成直流稳压电源和稳流电源。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定电源的设计和计算方法。

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

高性能直流稳定电源

曾大鑫 著

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 8.75印张 192千字

1989年7月第一版 1989年7月北京第一次印刷

印数0001—4990册 定价5.20元

ISBN 7-120-00612-6/TM·161

前 言

直流稳定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定电源已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 and 调试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。

本书在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一些。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、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。第三章则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。第四章介绍了集成稳压电源和稳流电源的设计要点及其应用电路。

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。

本书初版时（原名《高性能晶体管直流稳压电源》）承北京无线电技术研究所陈恒庆同志及清华大学电子学教研室张乃国老师审阅，并对原书稿提出了许多宝贵意见与建议，谨在此致以衷心的感谢。

本书（原名《高性能晶体管直流稳压电源》）于1984年9月出版以来，1986年11月重印一次，这次修订时增加了集成稳压电源与稳流电源的内容，并更改书名为《高性能直流稳定电源》。增加的内容又经清华大学张乃国高级工程师审阅，修订时参考了资料[27]～[37]，在此谨向有关的作译者及该章内容的审阅者一并致谢。

作者

1988年2月

于水利电力部西安热工研究所

目 录

前 言

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 U_o 的计算(7)	
第三节 基本型稳压电路的理论计算	9
一、基本电路(9) 二、电路方程式(12) 三、理论计算公式(14) 四、计算举例(19)	
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(31) 三、理论计算公式(34) 四、计算举例(35) 五、恒流源负载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、基准电压电路的设计与计算(68) 三、取样电路的设计与计算(74)	

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(91)	
第三节 保护电路的设计与计算	93
一、限流型保护电路的设计与计算(95)	
二、减流型保护电路的设计与计算(97)	
三、截流型保护电路的设计与计算(103)	
四、过电压保护电路的设计与计算(106)	
五、过热保护电路的设计与计算(109)	
第四节 调整级的设计与计算	111
一、调整级等效参数的计算(111)	
二、减小调整管最小压降的方法(114)	
三、调整管的散热设计(116)	
四、调整级的设计(125)	
第三章 稳压电源的整机设计、调试方法和实用电路	128
第一节 整机设计	128
一、设计步骤和设计举例(128)	
二、启动过程与启动条件(140)	
三、远距离供电的传输方法(144)	
四、改善波纹电压的措施(147)	
第二节 稳压电源的调试步骤与性能测试方法	150
一、调试步骤(150)	
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	156
一、2~9V输出的典型电路(156)	
二、9~48V输出的典型电路(159)	
三、输出电压从零伏起调直流稳压电源的典型电路(162)	
四、新型高效率直流稳压电源的典型电路(166)	
第四章 线性集成直流稳压电源和稳流电源	169
第一节 用集成运放作误差放大器的直流稳压电源	169
一、集成运放的主要参数和典型产品介绍(169)	
二、基本电路及其设计要点(176)	
三、应用电路举例(178)	
第二节 集成直流稳压器	192
一、分类、技术指标与设计要点(193)	
二、多端可调式集成稳	

压器及其应用电路(198) 三、三端固定式集成稳压器及其应用
电路(209) 四、三端可调式集成稳压器及其应用电路(229)

第三节 集成直流稳流电源245

一、稳流原理与技术指标(246) 二、用集成运放作稳流电源
(249) 三、用集成稳压器作稳流电源(252)

第四节 集成化基准电压源257

一、集成运放制作的基准电压源(257) 二、集成化高精度基准
电压源(262)

参考资料.....269

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.电压稳定度：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 $I_{0.}$ 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:

$$S_v = \left. \frac{\Delta U_o}{U_o} \right|_{\Delta E_i = \pm 10\% E_i}$$

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 ΔU_o 对输入电压(即整流滤波电路的电动势 E_i)的增量 ΔE_i 之间的计算公式。 ΔU_o 与 ΔE_i 的比值称为稳定系数 S , 即

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

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:

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

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 U_r , 峰-峰值的符号为 U_{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 U_{ir} 。 U_{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 U_r 可以近似用输入电压的波纹电压 U_{ir} 和稳定系数 S 的乘积来表示, 即

$$U_r \approx S U_{ir} \quad (1-2)$$

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 $U_{r,n}$ 及 U_n 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

$$S_I = -\frac{\Delta U_0}{U_0} \bigg|_{\Delta I_0 = -I_{0,n}}$$

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 ΔU_0 对输出电流的增量 ΔI_0 之间的计算公式，故将上式改写为

$$S_I = -\frac{\Delta U_0}{\Delta I_0} \cdot \frac{\Delta I_0}{U_0} \bigg|_{\Delta I_0 = -I_{0,n}} = R_0 \frac{I_{0,n}}{U_0} \quad (1-3)$$

式中： $R_0 = -\Delta U_0 / \Delta I_0$ ，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 α 。由定义可知

$$\alpha = \frac{\Delta U_0}{\Delta T} \cdot \frac{1}{U_0} = \alpha_T \frac{1}{U_0} \quad (1-4)$$

式中： $\alpha_T = \Delta U_0 / \Delta T$ ，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_i 是整流滤波电路的电动势， R_i 是整流滤波电路的等效内阻， U_i 是未经稳定的输入电

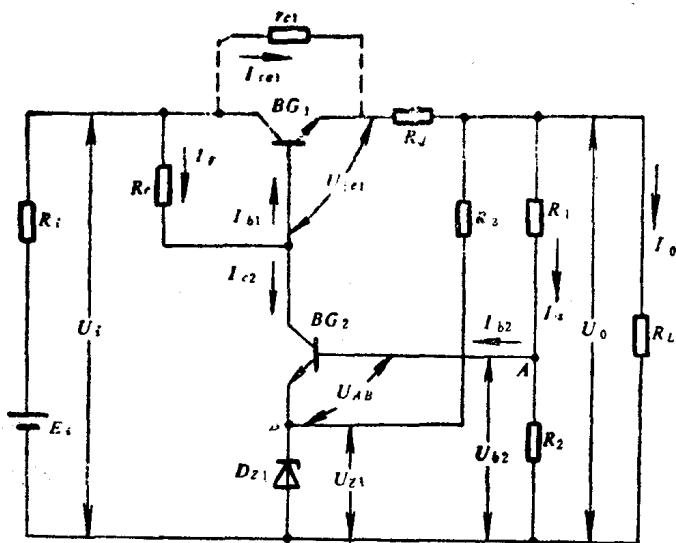


图 1-1 线性调整型晶体管直流稳压电源工作原理

压, U_o 是输出的稳定电压, I_o 是输出电流, R_L 是外负载, R_d 是过电流保护电路的检测电阻, BG_1 为调整管, BG_2 为放大管, D_{Z1} 为基准稳压管, R_1 和 R_2 为取样电阻。这种将调整级与负载串联的稳压电源称为串联型稳压电源。其调整作用是连续的, 所以又称为线性调整型稳压电源。调整作用是利用负反馈的原理来获得的。电阻 R_1 和 R_2 组成的分压器用来把输出电压 U_o 的变动量的一部分取出来, 加至放大管 BG_2 的基极上, 所以 R_1 和 R_2 支路称为取样电路。从 R_2 取得的电压

U_{b1} 叫做取样电压。为了保证取样电压只反映 U_0 的变动，而不受 BG_2 基极电流 I_{b2} 的影响，在设计中要使通过 R_1 和 R_2 的电流 I_s 远大于 I_{b2} 。由硅稳压管 D_{z1} 和限流电阻 R_c 组成的电路用来提供基准电压，它等于稳压管 D_{z1} 的稳定电压 U_{z1} 。 U_{z1} 加到放大管 BG_2 的发射极。 BG_2 起着将取样电压 U_{b1} 和基准电压 U_{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。 U_{b1} 和 U_{z1} 的差值 U_{AB} 称为误差电压， $U_{AB} = U_{b1} - U_{z1}$ 。 R_e 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。

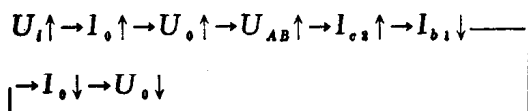
一、稳压过程

1. 外负载 R_L 不变，输入电压 U_1 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 ΔU_0 等于输出电流的变化量 ΔI_0 乘以负载电阻 R_L ，即 $\Delta U_0 = \Delta I_0 R_L$ 。输入电压 U_1 的变化，是通过两个途径来影响输出电流 I_0 的。其一是 U_1 的变化通过误差放大器的负载电阻 R_e ，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_0 的变化。其二是 U_1 的变化通过调整管 BG_1 的集电极至发射极的动态内阻 r_{e1} ，使流过其中的电流 I_{c1} 随之变化； I_{c1} 的变化直接引起输出电流 I_0 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 U_1 增加， U_1 通过 R_e 和 r_{e1} 使输出电流 I_0 有增加的趋势，而使 U_0 升高。 U_0 升高通过取样电路使取样电压 U_{b1} 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 U_{AB} 随之增加。 U_{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_1 集电极电流 I_{c1} 之差, 即 $I_{b1} = I_R - I_{c1}$, 所以 I_{c1} 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 U_o 维持基本不变。这里, 误差放大器输出的控制电流 I_{c1} 起着抵消 I_R 和 I_{c1} 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 U_i 减小时, 由于输出电流有减小的趋势而使 U_o 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 U_o 维持基本不变。

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 U_o 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 U_{s1} 等于基准电压 U_{z1} 和误差电压 U_{AB} 之和, 即

$$U_{s1} = U_{z1} + U_{AB}$$

当 $I_s \gg I_{b1}$ 时,

$$U_{o2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_o$$

所以有

$$U_o = \frac{R_1 + R_2}{R_1} (U_{z1} + U_{AB}) \quad (1-5)$$

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

则 $U_o = \frac{1}{n} (U_{z1} + U_{AB}) \quad (1-6)$

由式 (1-6) 知: 输出电压 U_o 取决于基准电压 U_{z1} 、误差电压 U_{AB} 和取样系数 n 。不论是输入电压 U_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 U_{z1} 、取样系数 n 以及误差电压 U_{AB} 都只有微小的变化, 所以输出电压 U_o 总是维持近似不变, 而且在改变取样电阻时, 可以调节 U_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 U_{AB} 的变化量越小。由式 (1-6) 知, U_{AB} 的变

化量越小，则输出电压 U_0 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稳压电路，是最早提出至今仍在应用的一种最基本的电路型式，别的电路型式均是在它的基础上发展起来的，故称为基本型稳压电路。图 1-1 就是这种电路的原理图。在实用电路中，为了提高稳压性能，调整级可采用几只管子复合连接，误差放大器可采用多级放大。此外，为了保护在输出短路时调整管不致损坏，采用过电流保护电路是必要的。图 1-1 中的 R_d 即为保护电路的检测电阻。在计算稳压性能时，需将 R_d 的影响考虑进去。

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

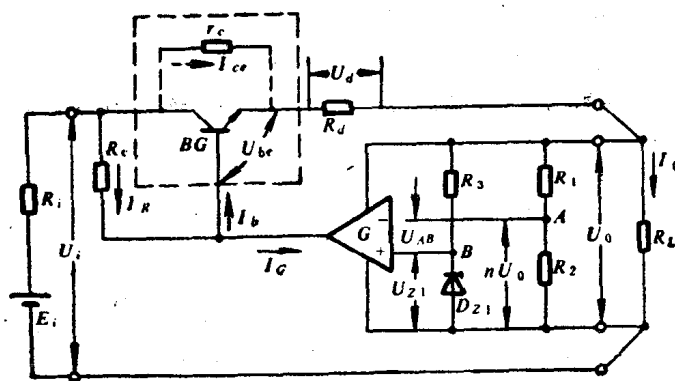


图 1-2 基本型稳压电源的通用电路

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。

调整级的主要参数是电流放大系数 β 、集电极至发射极的动态内阻 r_c 以及输入电阻 r_i 。 β 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 ΔU_{ce} 与电流增量 ΔI_{ce} 之比，即

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

r_i 等于发射结电压增量 ΔU_{be} 与基极电流增量 ΔI_b 之比，即

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

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 β 、 r_c 和 r_i 。举例来说，调整级由三个晶体管BG₁、BG₂、BG₃复合连接组成，如图1-3所示。已知BG₁的电流放大系数为 β_1 ，动态内阻为 r_{c1} ；BG₂的电流放大系数为 β_2 ，动态内阻为 r_{c2} ；BG₃的电流放大系数为 β_3 ，动态内阻为 r_{c3} 。调整级的电流总增益 β 为：

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{\Delta I_{c1}}{\Delta I_{b1}} = \frac{\Delta I_{c1}}{\Delta I_{b1}} \cdot \frac{\Delta I_{b1}}{\Delta I_{b2}} \cdot \frac{\Delta I_{b2}}{\Delta I_{b3}} \\ &= \frac{\Delta I_{c1}}{\Delta I_{b1}} \cdot \frac{\Delta I_{c2}}{\Delta I_{b2}} \cdot \frac{\Delta I_{c3}}{\Delta I_{b3}} \\ &= (1 + \beta_1)(1 + \beta_2)(1 + \beta_3) \approx \beta_1 \beta_2 \beta_3 \end{aligned} \quad (1-9)$$

调整级的动态内阻 r_c 为