

晶体管 直流电压变换器 的设计

М. И. 庫茲明科 著
苏联 А. Р. 西瓦柯夫

孙 琦 译

人民邮电出版社

71-6
447

晶体管直流电压变换器的設計

M. И. 庫茲明科
(苏联) A. P. 西瓦柯夫 著

孙 琦 譯

戴 熾 侗 校

人民邮电出版社

М. И. КУЗЬМЕНКО А. Р. СИВАКОВ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ
ПОСТОЯННОГО
НАПРЯЖЕНИЯ
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ 1961

內 容 提 要

本书叙述了晶体管直流电压变换器的基本原理,分析了晶体管变换器的各种线路,并给出了这些线路的设计方法。附录中带有设计实例。

本书可供设计、生产和使用电子仪器电源部分的工程师、技术人员和高等院校师生阅读。

晶体管直流电压变换器的设计

著 者: (苏联) М. И. 庫茲明科
А. Р. 西瓦柯夫

譯 者: 孙 琦

校 者: 戴 熾 侗

出版者: 人 民 邮 电 出 版 社

北京东四六条19号

(北京市书刊出版业营业许可证出字第〇四八号)

印刷者: 北 京 市 印 刷 一 厂

发行者: 新 华 书 店 北 京 发 行 所

經售者: 各 地 新 华 书 店

开本 787×1092 1/32

1965 年 12 月北京第一版

印张 4 14/32 页数 71

1965 年 12 月北京第一次印刷

印刷字数 101,000 字

印数 1—8,150 册

統一书号: 15045·总1529—无445

定价: (科 6) 0.55 元

前 言

在电子仪器的电源綫路中，采用了各种直流电压变换器。其中晶体管变换器是目前最有前途的一种。这种变换器与其他变换器相比，具有一系列决定性的优点。

晶体管变换器的文献仍然十分有限，主要是一些在杂志上介绍晶体管变换器綫路的文章。这些文章对选择和設計綫路的意見并不都是有充分根据的，而且还有許多是在不正确的前提下得出的。

本书试图系統地叙述晶体管变换器的基本原理、对各种晶体管变换器綫路进行比較和給出这些綫路的設計方法。作者以研究弛振蕩器的方法作为分析的基本方法。为了便于說明基本規律，根据晶体管变换器綫路中晶体三极管的特性和其他元件的工作特点，提出了一些假設。主要的注意力集中在变换頻率較低时的工作条件，这种頻率对于向电子仪器供电的晶体管变换器來說，是有代表性的。

上述方法能使各种不同的晶体管变换器綫路化成一种基本綫路。这样，就簡化了綫路之間的比較，并使設計步驟一致。

所介紹的有关晶体管变换器元件的知識、各种綫路的应用范围和計算实例，对解决实际問題是有所帮助的。

作者系統地總結了自己的研究成果，并采用了一些发表在杂志和論文集上的材料。由于篇幅的限制，还有一些与本书主要内容有关的問題，如电压和頻率的稳定、直流电压变为正弦交流电压、輸出矩形电压的反变换器在复数負載时的工作等未能一一加以闡明。这些問題應該作为專門著作的課題进行詳細的討論。

参 量 符 号

- B ——晶体三极管的静态电流放大系数;
 B_m ——变压器铁心中的最大磁感应, 韦伯/米²;
 B_s ——饱和磁感应, 韦伯/米²;
 C_s ——变压器线圈的寄生电容和晶体三极管的寄生电容折算到集电极线圈上的等效电容;
 I_K ——集电极直流电流;
 i_K ——集电极电流瞬时值;
 I_{KH} ——发射极-基极电压等于零时的反向集电极电流 (又称起始集电极电流);
 I_{kp} ——集电极电流在工作周期 (晶体三极管通导的半周期) 内的平均值;
 I_{Km} ——集电极电流最大值;
 I_{Kcp} ——集电极电流在一个周期内的平均值;
 i_L ——在等效电感中电流的瞬时值 (磁化电流);
 I_{Lm} ——磁化电流的最大值;
 I_H ——负载电流的直流分量; 没有整流时负载电流的有效值;
 i_H ——负载电流的瞬时值;
 $i_{H\theta}$ ——折算到集电极线圈的等效负载电流的瞬时值;
 i_N ——非线性等效二端网络的电流瞬时值;
 I_G ——基极直流电流; 基极电流在半周期内的平均值;
 i_G ——基极电流的瞬时值;
 I_1 ——变压器初级线圈一个臂中电流的有效值;

- I_2 ——变压器次級綫圈中电流的有效值；
 I_{BX} ——晶体管变换器輸入电流在一个周期内的平均值；
 $P_{доп}$ ——沒有附加外部散热器时 晶体 三极管 允許 耗散的功率；
 P_{CT} ——晶体三极管中的靜損耗；
 P_{nep} ——晶体三极管中的过渡損耗；
 $P_{\text{пacc}}$ ——晶体三极管的总耗散功率；
 r_H ——負載电阻；
 $r_{HЭ}$ ——折算到集电极綫圈的等效負載电阻；
 r_{σ} ——接在基极电路的电阻；
 r_H, r_{σ} ——分压器的电阻；
 r_1 ——初級綫圈一个臂中的有效电阻；
 U —— $i_L=0$ 时等效电感端的电压；
 u ——等效电感端电压的瞬时值；
 U_0 ——反饋綫圈一个臂上的矩形电压 有效值（也是平均值）；
 u_0 ——反饋綫圈一个臂上电压的瞬时值；
 u_1 ——初級綫圈一个臂上电压的瞬时值；
 U_{σ} ——发射极和基极之間的直流电压；发射极和基极之間的电压在半周期内的平均值；
 u_{σ} ——发射极和基极之間电压的瞬时值；
 U_K ——集电极直流电压；
 $\Delta U_{KЭ}$ ——手册中所給出的在一定工作 状态下 集电极-发射极的电压額定值；
 U_{KP} ——綫路工作时通导晶体 三极管 集电极-发射极間电压降的实际值；
 $U_{\text{кэм}}$ ——晶体三极管集电极-发射极間电压的最大允許值；

$U_{\kappa m}$ ——綫路工作时集电极-发射极間电压的最大值；

u_{κ} ——集电极-发射极間电压的瞬时值；

$u_{\kappa \delta}$ ——集电极-基极結电压的瞬时值；

U_{H} ——負載电压的直流分量。

目 录

前言

参量符号

緒論	1
----	---

第一章 晶体管变换器的工作原理和基本元件	3
----------------------	---

§ 1. 晶体管变换器的工作原理	3
------------------	---

§ 2. 晶体三极管	6
------------	---

§ 3. 变压器	15
----------	----

§ 4. 整流器	21
----------	----

第二章 晶体管变换器理論的几个主要問題	32
---------------------	----

§ 5. 晶体管变换器綫路的分类	32
------------------	----

§ 6. 晶体管变换器基本綫路的分析	34
--------------------	----

§ 7. 晶体三极管不同連接綫路的关系式	57
----------------------	----

第三章 晶体管变换器的各种綫路	64
-----------------	----

§ 8. 单端綫路	64
-----------	----

§ 9. 非对称式推挽綫路	74
---------------	----

§ 10. 电流反饋綫路	77
--------------	----

§ 11. 他激式綫路	81
-------------	----

第四章 晶体管变换器中元件的选择和綫路計算	86
-----------------------	----

§ 12. 綫路計算的原始数据	86
-----------------	----

§ 13. 晶体管变换器綫路和变换頻率的选择	88
------------------------	----

§ 14. 晶体三极管的选择及其接法 (并联和串联)	91
----------------------------	----

§ 15. 分压器电阻的計算,基极綫圈与集电极綫圈的匝数比的計算	94
----------------------------------	----

§ 16. 确定鉄心尺寸和計算綫圈	99
-------------------	----

§ 17. 选择整流元件和計算滤波器参量	104
----------------------	-----

§ 18. 晶体管变换器各种线路的计算特点.....	107
§ 19. 晶体管变换器的调节和试验.....	111
附录 1 小功率晶体管变换器计算举例.....	114
附录 2 功率为 100 瓦的晶体管变换器计算举例.....	125
参考文献.....	132

緒 論

直流电压变换器用以把蓄电池或低压发电机的直流低压变换成向电子仪器的板路和栅路供电所需的較高的直流电压。

由于有了直流电压变换器，就可以用一个低压电源来供給电子仪器所需的各种不同电压。直流电压变换器还可以是万能电源设备的組成部分，这种万能电源设备使我們能由电压种类和参量不同的各种电源向电子仪器供电。

在电子仪器的电源綫路中，采用下列几种变换器：

- 1) 电机变换器（无綫电变流机）；
- 2) 振动机机电变换器（振动机变换器）；
- 3) 晶体管变换器。

在电机变换器中，装有低压电动机和高压发电机。因此，这种变换器就是轉动式的双整流子电机，因而它的应用范围自然要受到限制。随着 其它 类型的 变换器的发展及其功率的提高，电机变换器逐渐停止使用。現在，只有当功率超过数百瓦时，才使用这种变换器。

在振动机变换器和晶体管变换器里，直流电压是由于依次地完成了下列三个过程而提高的，

1. 换流——将低压直流换为低压交流，
2. 变压——将低压交流变为高压交流，
3. 整流——将高压交流变为高压直流。

因此，变换器應該含有三个主要元件：换流器、变压器和整流器。在某些情况下，当电子仪器的不同电路需要多种不同电压时，則变换器中配备多綫圈的变压器和几个整流器。

在振動子變換器中，利用電磁鐵控制振動接點來進行換流和整流。雖然現代振動子的結構完善，但是機械轉換接點所具有的缺點阻礙着振動子變換器的應用。

在晶體管變換器中，利用晶體三極管張弛振蕩器作為換流器。整流通常也是用晶體二極管進行的。由於能夠使用頻率提高後的交流電壓，晶體管變換器里的變壓器就能做得非常緊湊。

晶體管變換器的上述特點使它比其他類型的變換器有許多顯著的優點。

因為沒有轉動部件，所以晶體管變換器的可靠性大，工作壽命長；又因使用小型元件，這種變換器的重量輕，尺寸小。晶體管變換器還不產生音響干擾，並能耐受顛簸震動。

特別應該指出，晶體管變換器的效率比較高；甚至當功率只有幾瓦時，效率就超過 75%。這大大地超過了同樣功率的振動子變換器的效率。當功率為幾百瓦時，晶體管變換器的效率可達 90—95%。

半導體器件對環境溫度敏感的缺點是人所熟知的。但在設計中可以採用適當的方法補償溫度的影響，所以這個缺點對晶體管變換器的影響是有限的。

晶體管變換器，由於本身具有許多優點，因而它的應用愈來愈廣泛。隨着質量的進一步提高和功率、電壓與溫度等使用範圍的擴大，晶體管變換器將成為對電子儀器供電的一種主要的直流電壓變換器。

第一章 晶体管变换器的工作原理和基本元件

§ 1. 晶体管变换器的工作原理

在晶体管变换器中，用矩形交流电压振荡器作为换流环节。振荡器是靠变压器反馈工作的，并且可按各种不同的线路装成。通过推挽式共发射极振荡器线路（图1）实例的讨论，很容易了解晶体管变换器的工作原理和基本元件的功用。

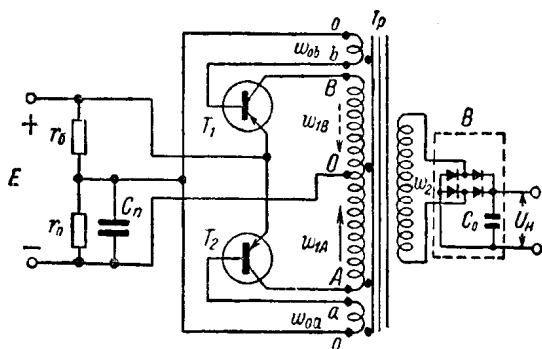


图1 晶体管变换器的基本线路

线路的基本元件有：晶体三极管 T_1 和 T_2 、变压器 T_p 和整流器 B 。线路的输入端接有分压器 r_{π} 和 r_0 。电阻 r_{π} 比电阻 r_0 大好几倍。供电电压的一小部分（即电阻 r_0 上的电压降部分）加到两个晶体三极管的基极-发射极电路，如果电压的极性如图所示，那么就能保证在线路接上电源后，使某一晶体三

极管的集电极-发射极电路有电流流过。

变压器 T_p 共有三个线圈：初级线圈、反馈线圈和次级线圈。有时，初级线圈又称集电极线圈，反馈线圈又称基极线圈，次级线圈又称输出线圈。初级线圈和反馈线圈都有中间抽头，且各有相应的两臂 (w_{1A} 、 w_{1B} 和 w_{0a} 、 w_{0b})。

整流器 B 由整流元件和滤波器所组成：整流元件接成一种全波整流线路；滤波器通常只用一个电容器。

为了把直流电压 E 变换成交流电压，必须使初级线圈中的电流能够按照图 1 中实线和虚线箭头的方向交替变化。这样，变压器铁心中变化的磁通，便在次级线圈上感应出交流电动势。由此可见，晶体三极管 T_1 和 T_2 应该象开关一样地工作，轮流地将直流电压 E 接到初级线圈的两臂。当转换时间较短时，就可以得到矩形交流电压。

在线路接上电源时，从电阻 r_0 上取得的电压，作为两个晶体三极管基极的负偏压（对发射极而言）。由于两个晶体三极管 (T_1 和 T_2) 以及初级线圈的两臂 (w_{1A} 和 w_{1B}) 不可能完全相同，所以一个晶体三极管的集电极电流和另一个晶体三极管的集电极电流之间总有某些差别。因为初级线圈两臂的安匝数不相等，变压器铁心中必然要产生一定的合成磁通。磁通的出现，将使反馈线圈两臂的两端上产生电动势。结果，一个晶体三极管的基极被加上负电压（对发射极而言），而另一个晶体三极管的基极被加上正电压（对发射极而言）。适当连接反馈线圈的引线，可以把负电压加到最初电流较大的晶体三极管的基极。这样将使基极电流增加，从而使集电极电流继续增加。

在接通电源时流过电流较小的晶体三极管，由于基极正电压的增长而更加截止。最后，一个晶体三极管完全导通，而另一个晶体三极管完全截止。这时，几乎全部电压 E （除去导通

晶体三极管上的电压降之外)都加在初级线圈的一个臂上。

初级线圈臂中所产生的电流,决定于磁通量和负载电阻。因为所加电压 E 几乎是不变的,所以磁通必然随时间按线性规律增长。当工作在磁化曲线的直线部分时,电流也同样按线性规律增长(它的起始值决定于负载电阻)。但是,随着变压器铁心的饱和,由于磁化电流急剧上升,因而初级线圈中电流的增长更加剧烈。初级线圈电流的极限值,决定于晶体三极管可能的最大集电极电流。当电流达到此值时,磁通不再增长,因而使基极线圈两臂的电动势迅速下降至零。基极电流和集电极电流开始减小,磁通也随之下降。在基极线圈的两个臂上又重新感应出电动势。但这次感应出的电动势,极性与前相反,结果使原来通导的晶体三极管的基极被加上正电压(对发射极而言),而以前截止的晶体三极管的基极则加上负电压(对发射极而言)。于是,第一个晶体三极管截止,而第二个晶体三极管通导。

由于第二个晶体三极管的通导,于是供电电压 E 加到初级线圈的第二个臂上。由图 1 可以看出,在这种情况下,截止晶体三极管发射极和集电极之间所加电压,等于供电电压 E 和初级线圈不工作臂上由磁通变化所引起的电压之和,后者也近似等于 E 。

第二个晶体三极管通导时,磁通变化和电流变化的过程,与第一个晶体三极管通导时的情况相同。不同之处,只是变压器铁心中磁通变化的方向和初级线圈第二个臂中的电流方向与前相反。当铁心趋向饱和和集电极电流达到极限值时,晶体三极管的状态将又发生转换。以后就周期性地重复这种过程。

由此可见,晶体管变换器的工作是基于晶体三极管状态自动进行转换。变压器铁心的饱和就是转换开始的信号。如果变

压器的参量及其鉄心的材料选择得适当，則晶体三极管通过的持續時間完全可以滿足給定的交流电压頻率。当电流达到集电极电流最大值时，晶体三极管的状态自动发生轉換。在一定的环境溫度下，这个集电极电流的最大值决定于基极电流。而基极电流的大小，在晶体管变换器中通常是由反饋电路的参量来决定的。

原則上，当初級綫圈电流达到集电极电流最大值的时刻早于鉄心飽和时，晶体三极管的状态也会发生轉換。但是，晶体管变换器在这种状态下工作是不稳定的，同时也是不經濟的。所以，通常是这样来設計晶体管变换器，即使变压器鉄心在初級綫圈电流小于集电极电流最大值时就开始飽和。

上面只是簡要地叙述了晶体管变换器的工作原理，还有許多工作特点沒有討論。但是，这些簡要的叙述对于了解各个元件的功用和它們之間的相互作用已够用。下面我們先討論一下这些元件，然后再对晶体管变换器在各种条件下的工作进行詳細分析。

§ 2. 晶体三极管

如前所述，晶体三极管在晶体管变换器綫路中使用的特点，是由它們所完成的开关作用决定的。

在放大器綫路或正弦振荡器綫路中，应当使加在晶体三极管发射极-基极結上的輸入信号，能够在集电极輸出电路中綫性地重現出来。这样就决定了对晶体三极管在选择参量、工作点和溫度补偿方面的一系列要求。

在晶体管变换器綫路中，对晶体三极管的要求是，当发射极-基极間輸入一个所需极性和幅值的控制信号时，集电极結的电阻最小。此时，集电极电路中的电流 I_k 决定于供电电压

和負載电阻的大小。繼續增加控制电流（发射极-基极电路中的电流 I_0 ）时，集电极电路中的电流不再变化。这种工作状态称为饱和状态。

当发射极-基极結上的輸入信号移去时，集电极結电阻應該增长到最大值，这时集电极电路中的电流下降到近似等于零。为了使由晶体三极管中載流子消散慣性决定的所謂过渡損耗很小，晶体三极管由一个状态向另一个状态的轉換應該迅速完成。

除了要求晶体三极管的轉換時間与周期宽度相比要尽可能小以外，还要要求晶体三极管具有最小的靜損耗。所謂靜損耗就是晶体三极管处在通导状态和截止状态时集电极-发射极間的損耗，以及基极电路中的損耗。

如果在集电极电流值 I_K 給定的情况下，集电极-发射极間的电压降不大时，那末通导晶体三极管的功率損耗很小。

要想减小截止晶体三极管的損耗，就应在集电极-发射极間加有最大电压 U_{KM} ，使集电极的起始电流 I_{KH} 很小。

基极电路中的損耗决定于电压 U_0 和电流 I_0 。因为发射极-基极結电阻不大，所以电压 U_0 不超过零点几伏。因此，如果基极电路中的电流 I_0 很小，基极电路中的損耗就可以忽略。但是，当通导晶体三极管的集电极电流 I_K 較大时，要想使其对应的基极电流值 I_0 很小，晶体三极管应有足够大的共发射极綫路静态电流放大系数：

$$B = \frac{I_K - I_{KH}}{I_0} \approx \frac{I_K}{I_0}$$

應該指出，正如前面所述，晶体管變換器中的晶体三极管工作在饱和状态，因而失去放大性能；所以这里所引用的“放大系数”是含有某种特定意义的概念。

晶体三极管的上述使用特点表明，为了选择晶体三极管和计算晶体管变换器线路，只需具备设计放大器或振荡器时所用特性曲线和技术数据中的一部分就够了。

其次，计算晶体管变换器还需要一些额外的数据。这些数据在把晶体三极管用于其它场合时是不需要的。

晶体三极管的静态输入特性曲线和静态输出特性曲线，是计算晶体管变换器所需的主要特性曲线。这些特性曲线是把晶体三极管接成共发射极线路，并在直流情况下（图2）测定的。

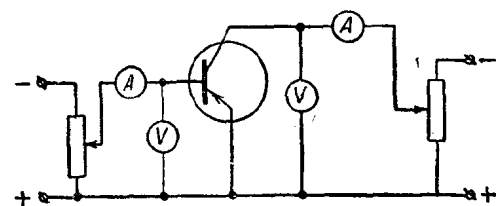


图2 测定晶体三极管静态特性曲线的线路

连接电源时，要使电源的极性符合P-n-p型晶体三极管所需的极性。为了减少测量仪表带来的误差，基极电路中的电流计要

接在电压表的前面，因为它的内阻与晶体管发射极-基极间电阻可相比拟。输出电路中的伏特计，在 U_K 很小时，也要直接和晶体三极管并联。同时这些伏特计应该具有较高的内阻。

输入特性曲线 就是 $U_K = \text{常数}$ 时 $i_b = f(u_b)$ 的关系曲线，它是在 U_K 取各种不同值的情况下测得的。这种输入特性曲线族示于图

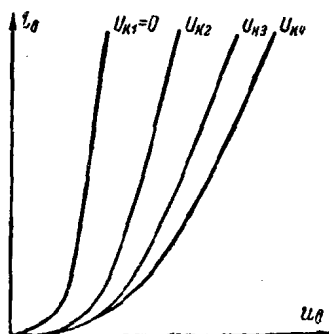


图3 晶体三极管的输入特性曲线，
 $U_{K4} > U_{K3} > U_{K2} > U_{K1}$

3。根据输入特性曲线，可以在给定电压 U_K 的条件下，求出