

感应加热程序调节器

M. B. 卡拉梅采娃 Л. H. 库拉科夫

C. M. 普什卡列夫



科学出版社

73.823

114

感应加热程序调节器

М. Б. 卡拉梅采娃

Л. Н. 库拉科夫 著

С. М. 普什卡列夫

陈 世 环 译

科学出版社

1975

内 容 简 介

本书系针对感应加热规范的程序控制问题而作。书中阐述了采用两种调节器——被加热体温度程序调节器和感应器电压程序调节器的综合程序控制方法；分析了在使用温度调节器和电压调节器时加热规范程序控制系统的动态；提供了可以评价给定程序重现精度的公式；详细地说明了在生产条件下已使用多年的具体型号的调节器。

本书可供从事感应加热工作的工程技术人员参考。

Маргарита Борисовна Коломейцева

Лев Николаевич Кулаков

Станислав Михайлович Пушкарев

ПРОГРАММНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

М., «Энергия», 1972

感应加热程序调节器

М. Б. 卡拉梅采娃

Л. Н. 库拉科夫 著

С. М. 普什卡列夫

陈 世 环 译

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1975 年 7 月第 一 版 开本：787×1092 1/32

1975 年 7 月第一次印刷 印张：1 13/16

印数：0001—12,700 字数：39,000

统一书号：13031·337

本社书号：514·13—3

定价：0.21 元

序 言

感应加热是零件热处理方法之一，它的原理是利用电磁场把电能无接触地传送给被加热体。被加热零件放到感应器中，感应器通上高达几千安的高频电流。零件靠其表层析出的能量进行加热。

在工业中感应加热使用甚广。尤其在为了得到强度更高的零件表面层的零件淬火中更是如此。和一般炉子加热比较，感应加热的特点是加热速度快，热处理质量好，生产率高，经济。然而所有这些感应加热的优点，只有通过加热规范的自动调节才能落实，而且程序调节能保证达到更高的热处理质量。

本书所述的就是各种复杂程度的程序调节器，它们可以保证实现按工艺人员给定的热曲线进行感应加热规范的控制。本书着重于这些调节器工作动态和静态的计算，因为有关加热的工业应用及其自动化方面的书籍^[1,2]对这些问题的阐述是不充分的。

本书所述程序调节器，是由莫斯科动力研究所专业设计局为里哈乔夫汽车厂研制的，并且在该厂的车间已顺利地使用多年。

作 者

目 录

序言	i
引论	1
第一章 感应加热规范的综合程序控制原理	3
第二章 感应加热程序调节系统电路及结构	9
(一) 感应加热温度程序调节器	9
(二) 感应器电压程序调节器	18
(三) 感应器电压简化程序调节器	22
(四) 感应加热程序调节系统中的调节装置	30
第三章 感应加热程序调节系统动态	35
(五) 温度程序调节系统动态	35
(六) 感应器电压程序调节系统动态	42
结论	52
参考文献	53

引 论

通常,大量热处理成批的相同零件时,采用感应加热法。因此,调节加热规范的主要目的,是在保证热处理工艺所规定的质量的前提下,达到所有处理件具有相同的性能。由于被加热件的温度取决于能源大小及加热时间,因而将加热能以定量是完全必要的。此外,零件热处理质量与热曲线形式有很大的关系。因此,为了获得高质量淬火件,必须有一个加热系统,以保证这些零件按工艺人员规定的热曲线进行加热。

目前成批出产的感应加热装置上,仅仅采用了时间定量感应加热法,即加热装置上装有一个限定时间范围的时间继电器,在这个时间范围内高频发电机可与感应器接通。这个时间过去后,高频发电机开始关闭。此时发电机输送给感应器的功率取决于发电机励磁电压值这个常数。图1所示是该加热装置的原理图,其中OBГ表示发电机励磁绕组,Г表示发电机, C_H 为调整电容,T3表示淬火降压器,ИД表示带零件的感应器,PB表示时间继电器,CC代表比较电路,ЭМВ代表电机放大器。

所要求的发电机电压值由加热前的整定值 U_0 (U_0 可以变动)给定。发电机实际电压 U_2 进入比较电路,并在这里与 U_0 相比较,相比较后如果电压不一致,那么就有一个信号输向控制发电机励磁的电机放大器。这样的装置不能控制加热规范,也不能保证以恒定温度使零件一个个连续地重复加热。因为反馈电路只能控制系统的一部分,因此只能减少发电机

电路内部起作用的那些干扰因素的影响。网路频率发生变化,淬火降压器及感应器老化和更换时,输向感应器的功率也就在相当大的范围内变化,于是引起加热温度的变化。

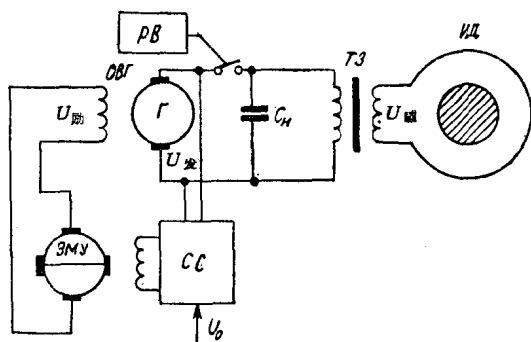


图1 带有发电机稳压电路的定时感应加热装置

有一些加热装置上装有磁放大器或可控硅放大器,作为放大功率之用。这会显著地改善发电机电压的稳定质量,但并未根本地解决问题。只有采用程序加热调节器才能按照规定的热曲线对感应加热的规范进行控制。

工业上成批生产了一系列型号的程序调节器^[3],可以用在感应加热上。然而它们不能解决目前在感应加热领域里出现的各种各样的问题。下面将要谈到的程序调节器与现有的比较,具有一系列特点,并在不能应用成批生产的调节器的那些场合可应用这种调节器。

第一章 感应加热规范的综合程序

控制原理

似乎按照热曲线来进行恒定感应加热为最好。那么,普通的温度调节器就可以保证达到这种要求。在成批生产中,当感应加热的零件作前进和旋转运动时,需要采用足够精确的温度传感器,如果没有这种传感器,要解决这个问题是不可能的。在一定条件下热规范的良好重复性是在定感应器电压的情况下,即保证自动保持感应器恒压的情况下获得。此时对于热曲线形状起影响作用的是系统之未被反馈电路包括的那些因素的干扰作用。这些干扰作用有:零件原来结构和尺寸的变化,热扩散条件的变化和网路频率的变化。如果这些干扰作用并不大,则可以获得感应加热规范的良好重复性。此外,如果按一定程序改变感应器上的电压,那么,可以获得保证淬火件优质的热曲线形状。此时必须的电压程序可以在解同加热温度和热源功率有关的热传导方程的基础上理论地获得。从方程解中可以判定能保证物体按给定温度曲线 $\tau(t)$ 加热的功率变化函数的种类。按照功率可以决定感应器电压变化曲线 $U_{\text{感}}(t)$ 。如果接着使电压调节器中的程序电压为 $U_{\text{调}}(t)$ 并给定 $U_{\text{感}}(t) = U_{\text{调}}(t)$, 那么被加热体的温度将随曲线 $\tau(t)$ 变化。假设零件传递函数 $W_{\text{热}}(p)$ 即零件表面温度 $\tau(p)$ 同单位表面上的功率 $P(p)$ 之比的拉普拉斯表示式

$$W_{\text{热}}(p) = \frac{\tau(p)}{P(p)} \quad (1)$$

是已知的,那么在上述的基础上就可以得出感应器电压程序

$$U_{\text{程}}(t) = \sqrt{AP(t)}^{[4]}, \quad (2)$$

式中 $P(t) \approx P(p) = \frac{\tau(p)}{W_{\text{程}}(p)}$ 为拉普拉斯功率表示式原函数;

A 为常系数。

然而这样计算 $U_{\text{程}}(t)$ 是复杂的, 结果是不准确的, 因为在计算中很难考虑到加热时可能发生的各参数的所有非线性变化。

解决 $U_{\text{程}}(t)$ 的最简便方法还是通过实验。为此要做一系列试验, 在这些试验中特意采用程序控制温度的方法, 以保证零件表面温度按照所要求的规律变化, 同时要测量并记录下感应器电压对时间的关系 $U_{\text{感}}(t)$ 。这些试验带有用实物进行物理模拟的性质, 并且可以相当精确地求出需要的关系式 $U_{\text{感}}(t)$ 。

因此, 感应加热规范调节器应当是组合式的, 其中有用来调整加热规范的温度调节器和在使用状态中使用的电压调节器。

图 2 所示是感应加热温度程序调节系统方块图。这个系统包括感应式高频机械发电机 Γ , 调整电容 C_{H} , 降压器 $T3$, 带零件的感应器 ИД , 温度传感器 ДТ , 温度程序调节器 ПРТ , 调节装置 РУ 和校正反馈部分 БК 。电机放大器或磁放大器可以当作调节装置用。温度程序调节器^[5,6]由四个主要部分组成: 温度程序给定部分 БПТ , 比较电路 СС , 晶体三极管直流放大器 У 及供电部分 Π 。为了记录感应器电压的变化, 在感应器端子上接上记录器 3У 。

在开始工作之前, 先编排出所需要的零件表面温度变化程序。程序电压和从温度传感器即热电偶来的电压进到比较电路。比较电路输出电压 ΔU 同零件要求的温度值和实际温度值的差成比例。该差 ΔU 在晶体三极管直流放大器放大,

然后输入到调节装置,因而,正是信号值 ΔU 决定着控制作用,并控制温度程序调节器。可以采用任何直流放大器当作失配信号放大器来用。对其提出的要求如下:当这个系统无补充调节地工作期间(约 1 小时)输入端的零点漂移值比系统的允许误差级小一级。当放大器输出电压正相应于发电机最大容许激励电流时,放大器的输入-输出静态特性在直线段后应有一个饱和区。这种特性之所以必要,是由于零件在居里点温度时的性能所引起的,在居里点的温度时,被加热零件的电感急剧变化,其结果发电机放大系数显著减小。发电机放大系数的减小导致整个系统放大系数的减小和系统误差的增大,即 ΔU 的增大,而且 ΔU 的增大可能达到如此严重的程度,以致在晶体管直流放大器及调节装置(即 ΔU 放大电路)中无限制的情况下它会导致发电机输出电路中出现非常超压。

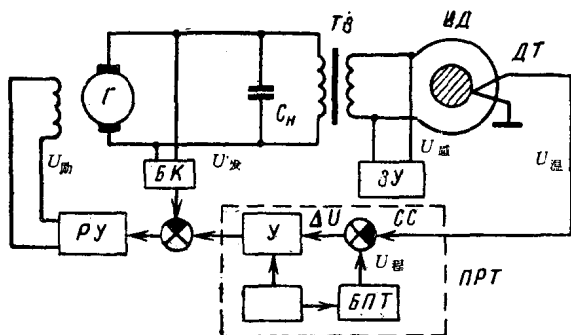


图 2 感应加热温度程序调节系统方块图

系统的工作精度,即给定温度程序重现精度 $\Delta_T(t)$ 基本上取决于三个分量:取决于系统结构和主控作用 $U_{\text{程}}(t)$ 类别的系统性误差 $\Delta_{\text{系}}(t)$, 温度程序给定部分误差 $\Delta_{\text{程}}(t)$ 和偶然扰动的影响 $\Delta_{\text{扰动}}(t)$ 。

图3及图4是感应器电压程序调节系统方块图, ПРП表示电压程序调节器, БПН表示电压程序给定部分, БОС表示反馈部分, МУ为磁放大器, ТП为供电降压器, 图中作为调节装置分别应用了低频磁放大器或电机放大器以及高频磁放大器. 在这些系统的反馈部分感应器电压用变压器降压, 由电容滤波器展平并矫直. 反馈部分输出端程序电压 $U_{\text{程}}$ 及反馈电压 $U_{\text{反}}$ 间的差, 经比较电路之后输到半导体放大器, 然后到调节装置. 带有高频磁放大器的系统也有一个降压器, 以供磁放大器之用.

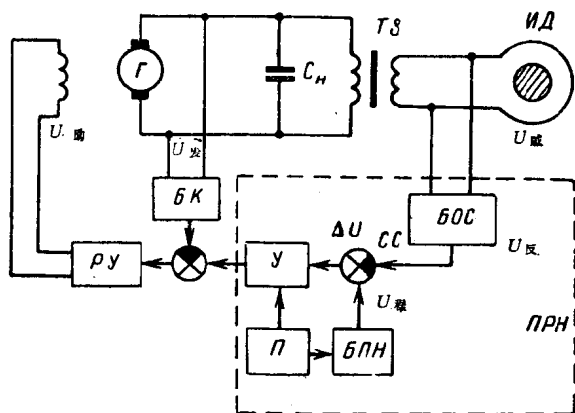


图3 采用电机放大器或低频磁放大器作为调节装置的
感应器电压程序调节系统方块图

感应器电压程序调节系统的工作精度, 即给定电压程序重现精度 $\Delta_{\text{重}}(t)$ 的决定因素和温度调节情况一样. 正如下面所述, 我们所研究的感应器电压调节系统是静态的. 这些系统的电压程序部分构成的方法是电压程序以阶式曲线型式给定的. 在稳定规范内, 在阶式(跳跃式)输入信号的情况下静态系统工作精度的特点是有静态误差. 静态误差值取决于输

入信号电平和系统的放大系数。对于每一个程序阶来说,这将是一个一定的常数。在发电机放大系数可能大大减小的居里点范围内静态误差将会增大。然而系统中的静态误差影响可以排除,如果给定较高 $U_{\text{程}}(t)$ 电平的话,这时提高值应等于静态误差值。因此可以认为,电压调节系统总的工作精度 $\Delta_{\text{压}}(t)$ 取决于电压程序调节器误差 $\Delta_{\text{程}}(t)$ 和系统的反馈电路内部的扰动作用的影响 $\Delta_{\text{反馈}}(t)$ 。

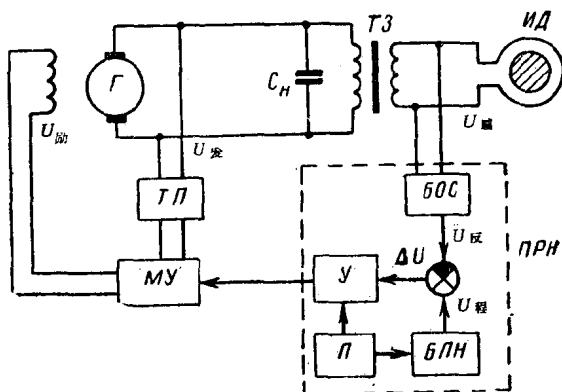


图4 采用高频磁放大器作为调节装置的感应器
电压程序调节系统方块图

如果谈到电压调节器工作时温度曲线重现误差 $\Delta_{\text{温}}(t)$, 那么它即取决于电压程序重现误差 $\Delta_{\text{压}}(t)$, 也取决于反馈电路以外的作用于系统的某些组成部分上的干扰所造成的影响(零件尺寸变化, 零件在感应器中位置的变换等)。如果在一定的条件下假设, $\Delta_{\text{反馈}}(t) = 0$, 并在给定程序时考虑了静态误差, 那么 $\Delta_{\text{压}}(t) \approx \Delta_{\text{程}}(t)$ 。此外, 如果可以忽略反馈电路以外的干扰作用的影响, 那么 $\Delta_{\text{温}}(t) \approx [2U_{\text{程}}(t) + \Delta_{\text{压}}^2(t)]/B$ 。假设加热温度 τ 及感应器电压 $U_{\text{感}}$ 之间存在 $\tau = BU_{\text{感}}^2$ ($B = \text{常数}$) 的关系, 上式是可以达到的。那时, 当把 $U_{\text{程}}(t)$ 变 $\Delta_{\text{压}}(t)$

1105160 · 7 ·

时, 加热温度也发生 $\Delta_{\text{温}}(t)$ 的变化, 而且 $\tau(t) + \Delta_{\text{温}}(t) = B[U_{\text{程}}(t) + \Delta_{\text{压}}(t)]^2 = B[U_{\text{程}}(t)^2 + 2U_{\text{程}}(t)\Delta_{\text{压}}(t) + \Delta_{\text{压}}^2(t)]$. 在实际中当运用 БРН-1 型电压调节器^[5]加热时可达到 $\Delta_{\text{温}} < 1\%$.

第二章 感应加热程序调节系统 电路及结构

(一) 感应加热温度程序调节器

通用温度程序调节器^[5]可按给定程序对零件温度进行调节,此时的温度传感器乃是焊到被加热零件表面上的热电偶。

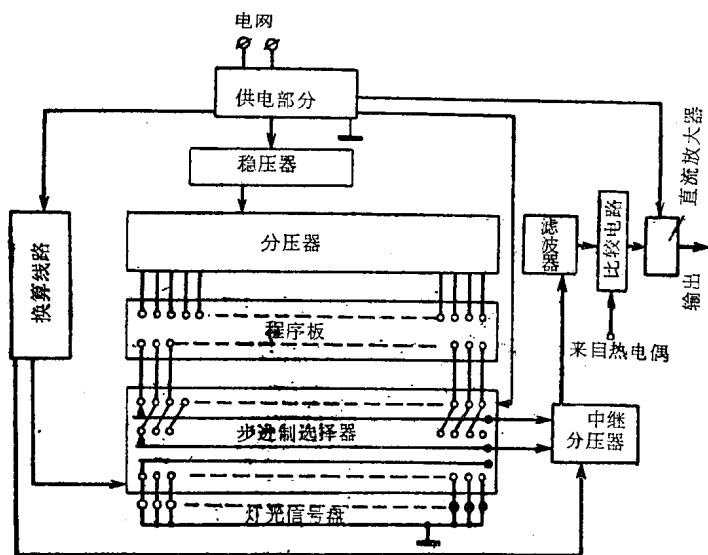


图5 通用感应加热温度程序调节器方块图

温度程序调节器方块图见于图5。调节器系统最重要的是程序给定部分^[7],其简化线路示于图6。

所以有必要设计专用的程序给定部分,是由于以下原因

步进制选择器

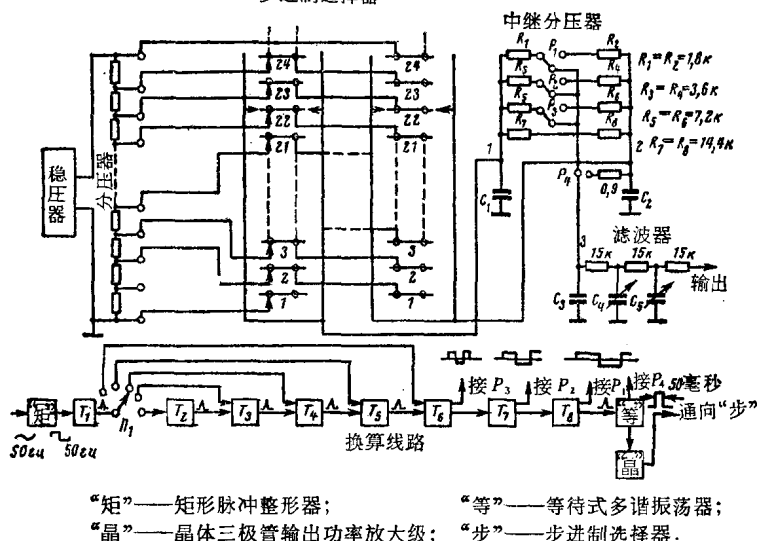


图 6 温度程序调节器程序给定部分简明线路图

决定的。在目前工业所生产出来的程序调节器中，程序给定是靠成型样板(如综合“热自动装置”系统的 БПБ-1 部分)，或者图带，其程序读出是靠光电头(如调节器 PY5)^[3]。这些程序给定器不具备许多感应加热场所必需的快速的动作条件。它们改编程序的范围是有限的，而这在加热程序试调的情况下却是特别重要的。由于它们是根据电位计随动系统的原理搞成的，其精度低于半导体程序给定器的精度。在该程序装置中，温度程序从分压器以分压形式间断地给定，而分压器是由半导体直流电压稳定器供电的。分压器的最大电压值相应于被反映参数的最大值，即等于 1100°C 。

分压器是由 110 个相同的高精密电阻串联起来的电路。每两个电阻连接起来的一个结，都接到温度程序调节器专用程序板的接头上。程序板有 110 个这种电位点。这样，温度程

序的间隔

$$\delta\tau = 1100/110 = 10^{\circ}\text{C}. \quad (3)$$

时间程序阶的转换靠具有 25 个工作接片的 ШИ-25/8 型步进制选择器进行。此时任一平滑温度时间曲线均可表示为最大阶数 $N_{\text{最大}} = 24$ 的阶形曲线(图 7)。

步进制选择器一个汇流排 A 的接片, 同温度程序调节器程序板的接头排连接。所需温度程序的给定, 是通过汇流排 A 接头同分压器接头用软导线接起来的方法(图 5 及 6)实现的。

为了提高程序给定的可靠性和精确性, 在转换线路中采用了镀钼接点的步进制选择器。这种接点具有比一般接点小的接触电阻和比较高的耐磨性。同时为了提高可靠性, 在线路中还采用了接点加倍原理, 即当作转换程序用的步进制选择器两个汇流排 A 和 B, 用汇流排 A' 和 B' 并联起来。该转换线路的缺点是有接点和程序给定阶数有限。

当有脉冲从等待式多谐振荡器通过晶体三极管输出功率放大级到达步进制选择器工作绕组(图 6)时, 步进制选择器开始运动。等待式多谐振荡器的输入端耦合于晶体三极管分频电路, 而这个电路是由 8 个触发单元 T_1-T_8 和矩形脉冲整形器组成的。触发换算电路以 $f = 50$ 赫的频率工作并用 2 将该频率除 8 次。换算电路输出端的脉冲跟踪频率取决于转换

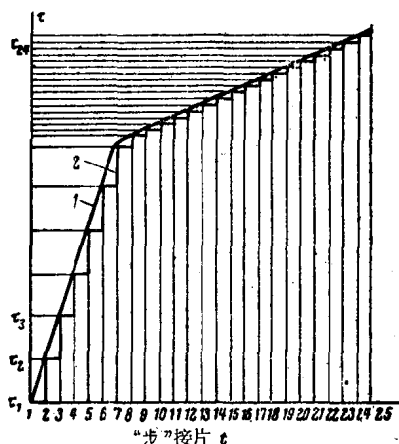


图 7 温度-时间曲线

1——原始平滑温度曲线; 2——阶形曲线。

开关 Π_1 所给定的接通触发单元数。使用此种分频电路可以获得以下的步进制选择器转换频率：0.19, 0.38, 0.76, 1.52 及 3.1 赫。与这些频率相适应，则程序扫描时间取决于 $t_{程1} = 128$, $t_{程2} = 64$, $t_{程3} = 32$, $t_{程4} = 16$, $t_{程5} = 8$ 秒。

电压在阶形程序曲线中的跳跃对调节过程的质量起不良的影响。为了排除这种影响，在程序给定部分进行阶形曲线的线性化。实现线性化的方法如下：程序信号首先到中继分压器，其中每一个程序电压阶都分成 8 个阶。在中继分压器的输出端可得到最大阶数 $n_{最大} = 24 \times 8 = 192$ 的阶形曲线。然后程序信号通过用于滤除阶形曲线基波的三节阻容滤波器。当用转换开关 Π_1 改变步进制选择器运动速度时，滤波器电容也相应地转换，目的是使滤波器适应信号脉动的变化频率。滤波器输出端所得的温度程序曲线实际上已是平滑的，然而这种滤波器给电路带来一个不大的滞后，这种滞后在给定程序时应加以考虑。中继分压器工作时，三个极化继电器 P_1, P_2, P_3 的接点将发生转换，其绕组则接向换算电路三个最后触发单元的集电电路上。在步进制选择器一个定位期间，继电器 P_1 转换 2 次， P_2 转换 4 次， P_3 转换 8 次。

这样，就造成了继电器接点位置 8 种的不同组合。从步进制选择器两个汇流排 A 及 B 的接片，同时向中继分压器的点 1 和 2 给出两个相邻程序阶的电压差。该电压差之一部分（从 $1/8$ 到 1）正相应于继电器 P_1, P_2, P_3 接点一定的组合位置，并且这一部分附加到电路点 3 的电位上。分压器电阻 $R_1 = R_2, R_3 = R_4, R_5 = R_6, R_7 = R_8$ 按二进制码编组，即 $R_3 = 2R_1, R_5 = 2R_3, R_7 = 2R_5$ （电阻额定值见电路图）。

这样来选择电阻可以保证中继分压器工作时其输出电阻 $R_{出}$ 保持恒定。这种条件之所以必须遵守，是因为电阻 $R_{出}$ 输入到程序信号分压器支路，以使其同反馈信号相比较。这样