

李镇铭 · 任和生 · 裴聿修 · 编译

自动控制基础

ZI DONG
KONG ZHI JI CHU

轻工业出版社

内 容 提 要

本书共八章，包括线性控制理论、非线性控制理论、采样系统、现代控制理论、最优控制以及随机控制等。除第八章外，均有大量例题、习题和习题解答。是一本较好的自动控制基础教材，也适合于独立自学。

本书适合高等院校自动化、计算机控制、自动化仪表、过程控制以及机械、化工、冶金等有关控制专业的教材，也可供有关专业技术和科研人员参考。

自动控制基础

李镇铭 任和生 裴丰修 编译

轻工业出版社出版
(北京广安门南滨河路25号)
轻工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行
各地新华书店经售

850×1168毫米1/32印张，12 字数：302千字

1989年12月 第一版第一次印刷

印数：1—5,000 定价：4.80元

ISBN7-5019-0231-3/TP·006

前 言

本书主要以日本九州大学工学院教授、工学博士相良節夫著的《基础自動制御》为蓝本，另参考国内外其它自动控制理论方面的教材及作者近年来的工作编译而成。

《基础自動制御》是相良節夫教授在广岛大学电力工程专业任职时的自动控制讲义稿加工整理而写成的。本书深入浅出、内容精练、理论密切联系实际，从工程实际出发，应用大量例题说明问题，使读者能容易地深入理解和掌握自动控制理论基本概念与应用控制理论解决自动控制系统的分析和设计综合问题。为便于读者自学，书中给出大量的习题和解答。所以本书是较好的自动控制基础教材或较好的教学参考书，尤其便于自学。

本书适作高等学校（电视大学、夜大学）自动化、计算机控制、自动化仪表、过程控制、机械、化工、金相、冶金等与自动控制有关的专业教学用书，也可供与上述专业有关的科技和研究人员参考。

书中1、2、4及7章部分内容由李镇铭编译，3章由裴聿修编译，5、6、8及7章部分内容由任和生编译，习题解答由李镇铭、任和生编译，全书由王广雄教授审校。本书在编译中得到谢绪恺教授、杨志厚、李世卿、舒迪前等副教授的指导与帮助。在此一并表示谢意。

由于书中涉及知识较广，作者水平有限，书中不妥与错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

编译者

目 录

1章 绪论	(1)
1.1 自动控制的发展	(1)
1.2 自动控制的基本概念	(3)
1.3 自动控制的基本术语	(7)
1. 控制系统中的各部分信号	(7)
2 构成自动控制系统的元件	(8)
1.4 自动控制系统的分类	(12)
1. 根据给定目标值的变化来分类	(12)
2. 根据控制量的种类来分类	(13)
3. 线性和非线性	(14)
4. 连续控制系统和采样控制系统	(15)
习题	(15)
2章 线性自动控制系统的理论基础	(16)
2.1 微分方程式和拉普拉斯变换	(16)
1. 线性系统的微分方程式	(16)
2. 拉普拉斯变换和微分方程式的解法	(23)
2.2 传递函数和方块图	(36)
1. 传递函数	(36)
2. 基本环节的过渡响应	(38)
3. 串联系统的过渡响应	(45)
4. 方块图及其变换	(51)
5. 信号流程图	(62)
6. 求系统传递函数的环路法	(72)
2.3 频率响应	(85)
1. 频率响应的表示方法	(85)

2. 基本环节的频率响应	(89)
3. 实际控制系统的频率响应	(99)
4. 最小相位移系统	(103)
习题	(106)
3章 反馈控制系统的特性	(113)
3.1 反馈的作用	(113)
1. 伺服系统的反馈	(113)
2. 过程控制系统的反馈	(118)
3. 多容系统的反馈	(124)
3.2 稳定判据	(126)
1. 劳斯稳定判据	(127)
2. 霍尔维茨稳定判据	(129)
3. 乃奎斯特稳定判据	(131)
3.3 闭环频率特性的求法	(136)
1. 用乃奎斯特图的方法	(136)
2. 用逆乃奎斯特图的方法	(138)
3. 尼克尔斯图(用增益一相位图的方法)	(139)
3.4 自动控制系统的性能指标	(141)
1. 自动控制系统的稳态特性	(142)
2. 自动控制系统的动态特性	(152)
3.5 根轨迹法	(165)
1. 根轨迹原理	(165)
2. 描绘根轨迹的一般方法	(168)
习题	(175)
4章 线性控制系统的设计	(180)
4.1 线性控制系统的设计步骤	(180)
1. 伺服系统的设计步骤	(181)
2. 过程控制系统的设计步骤	(182)
4.2 伺服系统的综合	(184)
1. 串联补偿(校正)	(184)
2. 反馈补偿	(203)

3. 采用根轨迹法的补偿	(206)
4.3 过程控制系统的设计	(211)
1. 过程控制系统的组成环节	(211)
2. 调节器的控制规律	(218)
3. 基于动态响应的过程控制系统的设计	(221)
4. 频率特性上的设计	(222)
习题	(225)
5章 非线性控制系统	(227)
5.1 非线性的种类	(227)
5.2 相平面分析法	(230)
1. 相平面作图法	(231)
2. 从相平面上求总能量和时间	(234)
3. 奇点与极限环	(236)
4. 非线性控制系统的相平面分析	(243)
5.3 描述函数法	(246)
1. 描述函数	(246)
2. 各种非线性元件的描述函数	(247)
3. 乃奎斯特图分析	(255)
习题	(258)
6章 采样控制系统	(260)
6.1 采样信号及其频率特性	(261)
1. 采样信号	(261)
2. 采样信号的频率特性	(263)
6.2 z 变换法	(266)
1. z 变换	(266)
2. z 反变换	(268)
3. z 变换有关定理	(270)
4. s 平面与 z 平面的映象关系	(272)
6.3 采样系统的设计	(273)
1. 脉冲传递函数法	(273)
2. 双线性变换法	(276)

3. z 域稳定判据	(278)
习题	(281)
7章 最优控制系统	(283)
7.1 系统的状态变量描述	(283)
1. 连续系统的描述	(283)
2. 离散系统的描述	(286)
3. 可观测性和可控制性	(289)
4. 最优控制的几个常用术语	(295)
7.2 古典变分法	(296)
7.3 最优调节器与观测器	(299)
1. 最优调节器问题	(299)
2. 观测器	(302)
7.4 极大值原理	(305)
7.5 动态规划法	(309)
1. 最优化原理	(309)
2. 连续系统的动态规则最优控制	(311)
3. 线性离散系统的动态规则最优控制	(313)
7.6 李亚普诺夫稳定判据	(316)
习题	(319)
附录1 矩阵、向量的微分	(320)
附录2 正定与半正定	(322)
8章 随机控制系统	(323)
8.1 随机控制系统的数学模型	(323)
8.2 随机最优估计	(324)
1. 离散随机控制系统的简化数学模型	(324)
2. 离散随机控制系统的简化噪声特性	(325)
3. 离散随机控制系统的卡尔曼滤波递推公式	(326)
4. 连续随机控制系统的卡尔曼滤波公式	(329)
8.3 随机最优控制	(332)
习题解答	(335)

1章 绪 论

1.1 自动控制的发展

在古代, 人们为生活而制造所必需的工具, 用这些工具种田、打猎。久经岁月, 这些器具发展成了机械设备。直到1765年瓦特发明蒸汽机为止, 所使用的动力源还都是风力、水力等, 在更多的场合又不得不依靠人力和畜力。从发明蒸汽机开始, 人们已有了能够自由使用的机械动力源, 但是用机器代替人的劳动还起始于第一次产业革命。瓦特的蒸汽机之所以能够得到实际应用, 是因为能够利用离心调速器控制速度使其为恒值, 所以自动控制的历史也可以说从这时开始算起。

此后, 为了提高离心调速器的精度, 很多人从事改良调节器的试验工作。但是, 由于为了提高精度而提高离心摆的灵敏度, 经常发生不稳定的现象。当时把这种现象归结为离心摆的特性差, 曾煞费心机地对这部分进行改良。

1868年麦克斯韦 (Maxwell) 发表了题为“关于调节器”的论文。文章中提出, 不仅讨论离心摆, 而且必须讨论由描述整个控制系统的微分方程式所导致的稳定性问题, 论文进一步提出由微分方程式所导出的代数方程式 (叫作特征方程式) 的特征根的实部是否是负值来判断稳定性。这是自动控制理论成为体系化的开端。根据马克思维尔的提议, 劳斯找到了判断特征方程的根的实部是否是正值的方法, 进一步霍尔维茨 (Hurwitz) 导出了用行列式判断稳定性的方法, 这两者互相结合就是我们所常用的劳斯—霍尔维茨稳定性判据。

随着机械和装置的越来越精密、复杂和高速化, 人们的手动操作已不能满足要求, 因此不得不让机器来自己管理自己, 也就

是不得不依赖自动控制和自动化。直到第二次世界大战前,采用微分方程的控制理论是占主导地位的,但在大战中由于武器生产方面大量地采用了自动控制技术,而渴望着建立实用性的控制理论。

1932年美国的贝尔电话研究所的乃奎斯特(H. Nyquist)推导出反馈放大器的稳定性的图解判别法。它用频率特性表示放大电路的特性,以后由该研究所的伯德(H. W. Bode)对反馈放大器作了更加仔细的研究,而提出了非常方便地表示频率特性的伯德图。由于自动控制系统中的负反馈与负反馈放大电路相似,以及负反馈放大器在通信领域的理论已经系统化,所以自动控制就借用了这方面的理论。可以说应用频率特性设计控制系统这种技巧性的控制理论是在第二次世界大战中形成的。这是一种实用性方法,它把系统的频率特性表示成矢量轨迹、伯德图等,按所要求的特性而设计出应添加的补偿环节(一般称校正装置)。

战后,这种控制理论被应用于生产方面,控制机械位置和角度的伺服机构和热工、化工生产中的过程控制都应用这种控制理论。

应用频率特性的这种设计技巧,是间接的设计方法,而考虑特征根的位置的方法则属直接法。1948年伊凡思(W. R. Evans)提出了根轨迹法,正确描述根轨迹是困难的,但由于容易找到根的大体位置,所以它具有容易把握控制系统设计方向的特点,因此也得到相当广泛的应用。

从战后10年的1955年起,美苏之间在宇宙开发方面激烈地竞争起来。控制发射人造卫星所用的火箭是非常严格的,有必要采用最优控制,即能够使某一性能指标为最大或最小的最佳(最优)控制。苏联的数学家庞特里亚金(L. S. Pontryagin)把过去的变分法扩展成极大值原理。这是新的控制理论的开端。另一方面在美国,应用数学家贝尔曼(R. E. Bellman),由于用电子数字计算机对最优控制进行计算,而提出方法简便的动态规划法,现已应

用在控制领域之外的其他各方面。此外,卡尔曼(R. E. Kalman)提出了卡尔曼滤波器,这是把卫星的状态值在噪声中,从混乱的数据里进行预报的理论,最优控制理论和它的组合在宇宙开发中作出了重大贡献。这样的控制必须与时时刻刻都在变化的状态相适应。因而必须对时时在变化的状态进行计算。如果把过去的控制理论叫古典控制理论,则上述的控制理论就叫现代控制理论。

象人造卫星那样的系统的动力学可通过物理规律来求得;而且只要考虑达到某种指标,在这种情况下应用现代控制理论可以得到很好效果,但是对于生产过程,因系统复杂,而且必须优先考虑经济成本,现代控制理论还难以应用。但是,现代控制理论对于解决特定的工程问题正在起到重要作用。近年来由于电子数字计算机的惊人发展,微处理机价格便宜,同时又可以把它作为一个控制元件来使用,所以可以期待现代控制理论在工业生产中也得到应用。

1.2 自动控制的基本概念

如果说过去的自动控制理论(古典控制理论)是借用了反馈放大器的理论,那么任何情况下把自动控制都说成是闭环控制,即反馈控制,也并不过分。

自动控制有种种定义,但一般情况下可以这样定义:“所谓自动控制是为了使物体、过程、机械等的某个量在外扰动的作用下能与给定的目标值相一致,即把这种量检测出来与给定目标值相比较,根据比较所得结果自动地给出相应的调整作用”。如果分析这一定义:“为了使……与给定目标值相一致”,这一段话是目的;“把被控制量检测出来与给定目标值相比较”这一段之后的部分表示的是作用,这里检测、比较所完成的任务是反馈作用。在自动控制中反馈是不可缺少的。尽管如此,近来也有人把顺序控制这样没有反馈的开环控制、应用数字计算机的高级控制和没有反馈的自动操作等也都归结为自动控制。

采用反馈控制可使系统得到如下二点改善

(1) 控制对象或过程（指生产过程中的控制对象）在受到外扰（外部的不利影响）作用时，可相对使其影响减小。

(2) 可以使控制量（想要控制的量）与给定目标值很好的保持一致，并且可以缩短响应时间。

但是，并不是说采用反馈后就能得到如上所述的改善效果，有时反馈会引起振荡，造成不稳定状态。作为自动控制系统必须具有较好的稳定性和动态性能。为了使设计的系统能满足要求，有必要采用微分方程式，或用建立在状态空间基础上的动态方程，或采用频率特性等方法来描述反馈系统的动态特性，分析或设计系统。构成、设计自动控制系统使其满足预先给定的性能指标的问题叫作系统的综合，是自动控制中的中心课题。

下边举简单的例子说明反馈控制系统

〔例1〕图1.2.1(a)是用人进行手动控制与自动控制系统两者对比漫画，试应用此图找出手动控制和自动控制两者的对应关系。

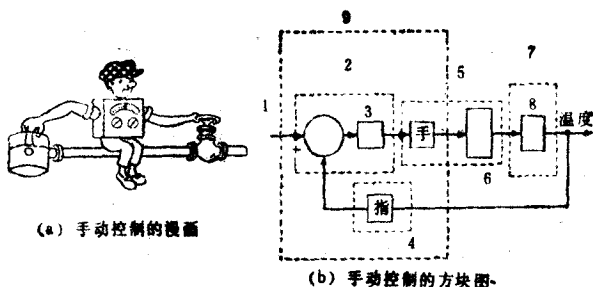


图 1.2.1 手动控制和过程控制

- 1—给定目标值 2—调节器部分 3—脑 4—检测部分
5—操作部分（执行机构） 6—阀门 7—控制对象 8—热
水箱 9—人

在图1.2.1(a)中，如果考察人的控制操作，则人用手指感

温，当手指感到的温度高于给定的目标温度，这时人将用另一只手关闭阀门，而使蒸气量减少，如果手指感到温度低，则反之打开阀门，使蒸汽增加。用脑判断由手指测得温度比给定目标温高或低，而后命令手进行操作，关闭或打开阀门，使温度保持一定。这里，从用手指测量温度到用手关、开阀门，包括人在内构成了反馈闭合回路，这就是负反馈闭环控制系统。如果把上述过程用方块图来表示(有关方块图的知识在后边讲述)，就是图1.2.1(b)。图中用脑进行判断而求出实际温度与给定目标温度之间的差值，根据差值正负的大小发出开、闭阀门的命令，用手执行命令去开、闭阀门。这样，根据实际温度与给定目标温度的差值信号，经过这样操作而使差值减小。

如果用机械完成上述控制动作，就是温度的过程控制，其方块图也如图1.2.1(b)所示。过程控制系统中检测部分的作用与人的手指作用相当；调节器的作用与人脑的作用相当；操作部分，即执行机构与人的手的作用相当。

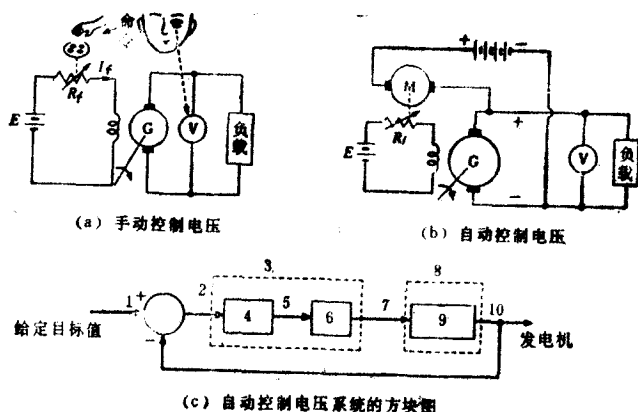


图 1.2.2 手动控制电压和自动控制电压

1—给定目标值 2—偏差电压 3—控制装置 4—电动机 5—位置 6—可变电阻 7—励磁电流 8—控制对象
9—发电机 10—电压

〔例2〕图1.2.2所表示的是简单电压自动控制系统。直流发电机通过改变激磁可以改变发电机的电压。在图1.2.2(a)中,当电阻 R_f 增加、减少时,则激磁电流产生变化使激磁磁通变化,而使发电机电压升高或降低。当进行手动控制时,用眼监视电压表,当电压表的指示电压比某一给定目标值低时,则增加激磁电流,使电压升高,当电压高时,可调节激磁电阻使电压降低。

对上述动作如果采用自动控制,其电路原理图如图1.2.2(b)所示。采用蓄电池的电压作为目标给定电压,该电压和发电机电压的差值加在电动机M上,电动机M根据差值电压的正或负而自动的改变电阻 R_f 。如果与给定目标电压相比,发电机的电压过高时,则电动机M转动,使 R_f 增加;反之发电机电压过低时,电动机转动使 R_f 减小,激磁电流增加,使发电机的电压增加。因此,即使在负载变化时也能使发电机的电压保持为恒值。自动控制电压系统的方块图如图1.2.2(c)所示。

〔例3〕在家用电器制品中有的必须保持温度为某一定值。例如:电被炉(或叫电热桌,用于取暖)、电熨斗、电冰箱、冷却器等等,其内部均装有恒温控制器。恒温控制器可采用双金属片(由黄铜和不胀钢两种膨胀系数相差很大的材料构成)和接点构成,这是简单的开关温度调节装置。图1.2.3(a)是电被炉的

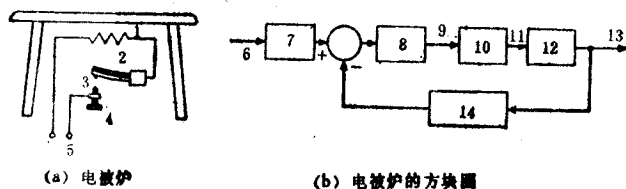


图 1.2.3 电被炉用恒温器控制温度

- 1—加热器 2—双金属片 3—接点 4—调节温度螺栓 5—电源
6—给定目标值——温度 7—调节温度螺栓 8—接点的接通或断开 9—电流 10—加热器 11—加热器产生热量 12—电被炉
13—温度 14—双金属片的弯曲

示意图,温度升高时,双金属片弯曲,接点开放而切断电流;反

之，当温度下降时，弯曲的双金属片复原，接点闭合使电流流通而加热，这样使电被炉的温度保持在一定幅度的范围内变化。因此，其方块图是如图1.2.3(b)所示的具有负反馈的闭环系统，其中用双金属片的弯曲来检测温度，并用它来切断或接通加在加热器两端的电压。如果转动调节旋钮，即可改变接点间的间隔。从而可以改变温度设定值。

1.3 自动控制的基本术语

因为本书主要讨论具有反馈的闭环系统，所以讲述与反馈有关的术语。自动控制系统很注意信号的传递及流通，所以常用方块图来表示自动控制系统。现以图1.3.1所表示的自动控制系统来确定各元件、各信号的名称。

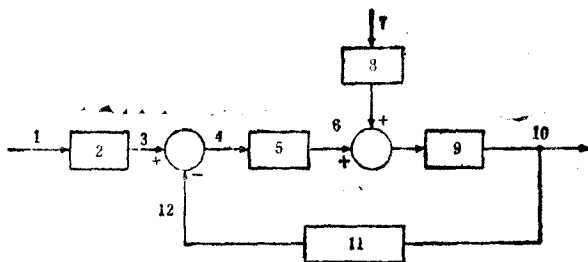


图1.3.1 反馈控制系统的标准形式

- 1—给定目标值 2—基准输入元件 3—基准输入 4—动作信号
(偏差或误差信号) 5—控制元件(补偿元件、调节器或校正装置) 6—操作量 7—外扰 8—外扰元件 9—控制对象
10—控制量(输出量) 11—反馈元件 12—主反馈量

1. 控制系统中的各部分信号

(1) 给定目标值(给定值, 目标值)

一个由外界来设定的某一恒值或某一变化量, 自动控制的目的就是使控制量(也就是输出量)与它相一致。

在过程控制中也叫作设定值。

(2) 基准输入信号

作为自动控制系统动作的基准，是直接加到闭环控制系统的输入信号，它与给定目标值有确定关系，它用来与从控制量引出的主反馈量进行比较。

(3) 动作信号

是基准输入信号和主反馈量的差值，是使系统进行控制的动作信号。也叫偏差信号。

(4) 操作量

是为了调节控制量，而由控制装置作用于控制对象的量。

(5) 控制量 (输出量)

是必须控制的量，同时也是可测量和可控制的量。

通常都把控制量叫作输出量。

(6) 主反馈量

为了与基准输入信号相比较，而从控制量引出的，与控制量具有一定关系的反馈信号。

在多环系统中，最外环的反馈信号是主反馈量。

(7) 外扰 使自动控制系统状态发生变化的外作用。

2. 构成自动控制系统的元件

(1) 基准输入元件

为了使给定目标值与主反馈量相比较而插入的输入变换元件。

(2) 控制元件

根据基准输入和主反馈量的差值，即偏差信号，给出操作量的装置。它所给出的操作量要保证控制过程能满足性能指标的要求。

(3) 控制对象

物体、过程、机械等等中被控制的那一部分称控制对象。在过程控制中也叫作过程。

(4) 反馈元件

检测出控制量并使其与基准输入相比较以得出偏差信号的元件。

(5) 外扰元件

是为了把外扰的影响换算到控制对象的输入端而用的元件。

图1.3.1所示的方块图，主要是针对随动系统的。对过程控制来说，控制对象是过程，而用于过程控制的控制装置，是市场上能够买到的组合装置。所以过程控制系统多数是按图1.3.2那样来划分元件的。

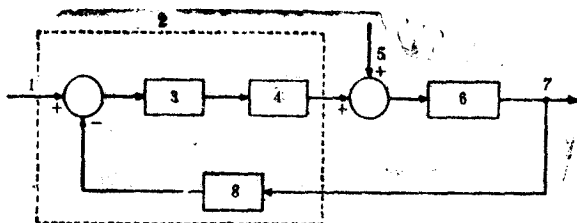


图 1.3.2 过程控制系统的方块图

1—设定值 2—控制装置 3—调节部分 4—操作部分 5—外扰
6—控制过程 7—控制量 8—检测部分

这时的控制装置由下列三部分组成。

(1) 检测部分

把控制量检测出来，并使其能与基准输入（设定值）相比较的部分。

(2) 调节部分

把动作信号，即偏差信号，变换成适当信号的部分。

(3) 操作部分（执行机构）

把从调节部分送来的信号变换成操作量而作用于控制对象的部分。

在例1中是由人来完成控制装置的作用的。其中象人的手指

那样的感觉器官是检测部分；人的脑是调节部分；手是操作部分。如果这样来想就容易理解了。下述就实际例题再把这些量和元件作一说明。

〔例4〕图1.3.3所表示的是跟踪控制的最简单的例子，是由直流发电机-电动机组构成的随动系统。

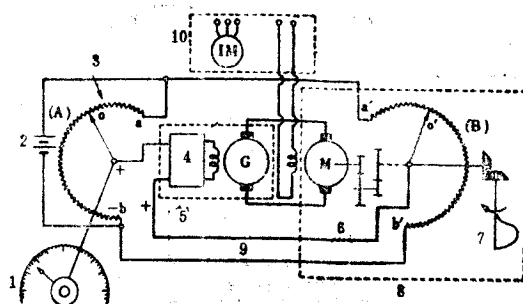


图 1.3.3 由直流发电机电机组构成的随动系统

- 1—给定目标值 2—电池 3—圆周型旋转可变电阻 4—放大器
5—控制元件 6—齿轮 7—控制量 8—控制对象 9—反馈元件
10—外扰

在图1.3.3中如果转动圆周型可变电阻A，则圆周型可变电阻B也跟踪A作同样动作，即构成跟踪控制。例如用在船舵上，把A和手柄B和舵分别装在按一定传动比的轴上，则两者可作同样的转动。因为是通过发电机-电动机组把电力变换成机械力，所以可毫不费力地用手柄来操纵船舵。

如果在完全相同的A、B两圆周型可变电阻的两端都加上一一定电压，当bo和b'o'完全相等时，则放大装置的输入端的电压为0，系统处于平衡状态。如果0点向a的方向或者向b的方向移动，那么就有正或负电压加在放大装置上，则电动机正转或反转。这时必须是使0'和0的差值减小，使0'和0相一致，这是负反馈的情况。如果相反的连接，则电动机的转向是使0'和0的差值