



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 1505864 B

(45) 授权公告日 2010.05.12

(21) 申请号 02809070.5

(51) Int. Cl.

(22) 申请日 2002.04.22

H02P 7/00(2006.01)

(30) 优先权数据

09/845,673 2001.04.30 US

(56) 对比文件

(85) PCT申请进入国家阶段日

2003.10.28

US 6091215 A, 2000.07.18, 说明书第5栏第  
54行至第22栏第46行,附图1—9.

审查员 奚爱玲

(86) PCT申请的申请数据

PCT/US2002/012735 2002.04.22

(87) PCT申请的公布数据

W002/089309 EN 2002.11.07

(73) 专利权人 美国艾默生电气公司

地址 美国密苏里州

(72) 发明人 J·G·马辛基维兹 D·C·洛维特

(74) 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司 72001

代理人 杨凯 罗朋

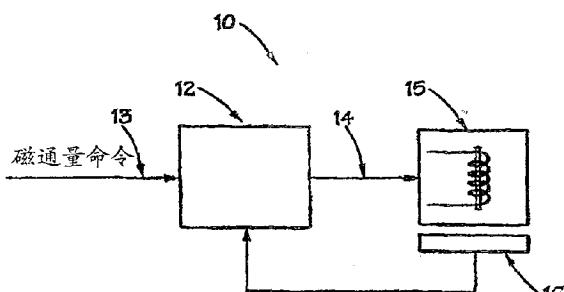
权利要求书 2 页 说明书 24 页 附图 37 页

(54) 发明名称

电磁执行器及其力控制系统

(57) 摘要

一种用于电磁执行器的力控制系统和电磁执行器，包括：观测器，它输出代表所述可动件瞬时位置和速度的信号；位置控制器，它接收所述观测器的所述输出信号和代表所需位置和所需速度的信号；所述位置控制器将所述观测器的所述输出信号与所述代表所需位置和所需速度的信号进行比较、以便产生位置和速度误差信号；所述位置控制器根据所述位置和速度误差信号，产生以所述所需速度把所述可动件定位在所述所需位置上所需要的力命令信号；磁通量控制器，它接收所述力命令信号并把所述力命令信号转变为磁通量命令信号；以及所述磁通量控制器根据所述磁通量命令信号产生相激励信号。由此可以改善磁通量控制的能力。



1. 一种用于电磁执行器的力控制系统,所述执行器具有带磁芯的静止件、可动件和至少一个相线圈,所述至少一个相线圈设置成当所述相线圈受激励时,在所述磁芯上建立磁通、以便把力作用在所述可动件上,所述力控制系统包括:

观测器,它输出代表所述可动件瞬时位置和速度的信号;

位置控制器,它接收所述观测器的所述输出信号和代表所需位置和所需速度的信号;

所述位置控制器将所述观测器的所述输出信号与所述代表所需位置和所需速度的信号进行比较、以便产生位置和速度误差信号;

所述位置控制器根据所述位置和速度误差信号,产生以所述所需速度把所述可动件定位在所述所需位置上所需要的力命令信号;

磁通量控制器,它接收所述力命令信号并把所述力命令信号转变为磁通量命令信号;以及

所述磁通量控制器根据所述磁通量命令信号产生相激励信号。

2. 如权利要求1所述的力控制系统,其特征在于:在X、Y参考系中控制所述可动件的位置。

3. 如权利要求1所述的力控制系统,其特征在于:在X、Y参考系中按照X和Y来控制所述可动件的速度。

4. 如权利要求1所述的力控制系统,其特征在于:所述观测器包括加速度计。

5. 如权利要求4所述的力控制系统,其特征在于:所述加速度计包括第一和第二加速度计,所述第一和第二加速度计具有连接到所述位置控制器的输出端,所述位置控制器把从所述加速度计接收的信号转换为所述可动件的所述位置和速度的估计值。

6. 如权利要求5所述的力控制系统,其特征在于:所述位置控制器还把位置和速度增益项加到所述位置和速度误差信号上,以便产生所述力命令信号。

7. 如权利要求6所述的力控制系统,其特征在于:所述位置增益项设置为0、以便仅仅控制所述可动件的速度。

8. 如权利要求1所述的力控制系统,其特征在于:所述位置控制器连续地接收所述观测器的输出信号。

9. 如权利要求1所述的力控制系统,其特征在于:所述位置控制器周期地对所述观测器的输出信号进行采样。

10. 一种用于电磁执行器的力控制系统,所述执行器包括具有磁芯的静止件、可动件和相线圈,所述相线圈设置成当所述相线圈受激励时在所述磁芯上建立磁通、以便把力作用在所述可动件上,其中,作用在所述可动件上的力与所述磁通的量值成正比,所述力控制系统包括:

磁通量观测器,它具有输入端和输出端,所述输入端连接到所述相线圈,所述磁通量观测器对加到所述相线圈上的电压进行低通滤波、估计所述相线圈中的磁通量并在输出端提供代表估计的磁通量的信号;以及

磁通量控制器,它接收力命令信号和所述磁通量观测器的输出信号,当所述磁通量命令信号比代表估计的磁通量的信号至少大一个预定量时所述磁通量控制器提供相激励信号以便激励所述相线圈以便增大所述相线圈中的磁通量,而当代表估计的磁通量的信号比所述磁通量命令信号至少大一个预定量时、激励所述相线圈以便减小所述相线圈中的磁通

量。

11. 如权利要求 10 所述的力控制系统, 其特征在于还包括:

力到磁通量控制器, 其输出端连接到所述磁通量控制器, 所述力到磁通量控制器接收所需的力命令作为输入信号并在所述输出端提供所述磁通量命令信号;

其中, 所述力到磁通量控制器根据与所述可动件相关的力和所述磁芯中的磁通量之间的关系把所述所需的力命令转换为所述磁通量命令信号。

12. 一种电磁执行器, 它包括:

静止的外组件, 它定义一个腔, 所述静止的外组件包括磁芯;

相线圈, 它设置成当所述相线圈被激励时在所述磁芯内建立磁通量;

可动件, 它设置在由所述静止的外组件限定的所述腔内、使得在所述磁芯内建立的所述磁通量把力作用在该可动件上;

磁通量观测器, 它具有输入端和输出端, 所述输入端连接到所述相线圈, 所述磁通量观测器对加到所述相线圈上的电压进行低通滤波、以便估计所述相线圈的磁通量、并在所述输出端提供代表估计的相线圈的磁通量的信号; 以及

磁通量控制器, 它接收磁通量命令信号和所述磁通量观测器的所述输出信号, 所述磁通量控制器提供相激励信号、以便当所述磁通量命令信号比所述代表估计的相线圈的磁通量的信号至少大一个预定量时激励所述相线圈以便增大所述相线圈中的磁通量、而当所述代表估计的相线圈的磁通量的信号比所述磁通量命令信号至少大一个预定量时激励所述相线圈以便减少所述相线圈中的磁通量。

13. 如权利要求 12 所述的电磁执行器, 其特征在于: 所述静止的外组件包括多个相同的磁去耦的 E 型磁芯, 每个 E 型磁芯形成一个中心臂和两个辅助臂。

14. 如权利要求 13 所述的电磁执行器, 其特征在于: 所述相线圈包括多个相线圈, 以及每一个相线圈环绕 E 型磁芯的所述中心臂、使得当电能加到给定的相线圈时在所述相应的 E 型磁芯中产生磁通量。

15. 如权利要求 14 所述的电磁执行器, 其特征在于: 所述多个相线圈是两个相线圈。

16. 如权利要求 14 所述的电磁执行器, 其特征在于: 所述多个相线圈是 4 个相线圈。

17. 如权利要求 12 所述的电磁执行器, 其特征在于还包括:

力到磁通量控制器, 其输出端连接到所述磁通量控制器, 所述力到磁通量控制器接收所需的力命令作为输入信号并在所述输出端提供磁通量命令信号;

其中, 所述力到磁通量控制器根据与所述可动件相关的力和所述磁芯中的所述磁通量之间的关系把所述所需的力命令转换为磁通量命令信号。

18. 如权利要求 14 所述的电磁执行器, 其特征在于: 所述相线圈是电气去耦的、使得流过任何给定相线圈的电流不受流过任何其他相线圈的电流的限制。

## 电磁执行器及其力控制系统

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本申请是序列号为 09/513,906 的美国专利申请（现为美国专利 No. 6,225,767）的部分继续申请，美国专利申请 09/513,906 又是序列号为 09/088,922 的美国专利申请（现为美国专利 No. 6,091,215）的继续申请，所述两个美国申请均通过引用而被全部包括在本文中。

### 技术领域

[0003] 本发明涉及新型的磁通量控制系统，具体地说，涉及用于运动控制应用的磁通量控制系统。再具体地说，本发明涉及用于摩擦焊机的新型运动控制系统。

### 背景技术

[0004] 在大多数电磁系统中，能量从系统的一个组件到另一个组件的传递对于所述系统的正确运行是至关重要的。在许多电磁系统中，能量的这种传递是通过适当地激励系统的一个组件以便建立与所述系统的另一个组件相互作用的磁通，以便把能量从受激励的组件传递给另一个组件。尽管在已知的电磁系统中，能量传递是靠所述磁通完成的，但是系统的磁通量并不直接受到控制。而是根据电流、电压和磁通量之间假定的关系控制加到受激组件的电流和 / 或电压，假定根据这个假定的关系控制电流和 / 或电压即可产生适当的磁通量。一般都实现这种对电流和 / 或电压的控制，因为先有技术至今尚未提供一种有效的、低成本的和易于实现的直接控制电磁系统中的磁通量的系统。

[0005] 电流和 / 或电压控制系统的一个缺点是，如上所述，电流、电压和磁通量之间的关系不易于用数学方法表达，而是随着各种不同的变量而非线性地变化。例如，系统中每一块电磁材料的具体特性都会使各个系统的电压、电流和磁通量的关系彼此不同，即使在一个给定的系统中，所述系统中的不同的部分也彼此不同。由于这些不同的电流和 / 或电压和磁通量之间的关系，难以精确地和恰当地控制电流和 / 或电压，以便产生所需的磁通量，从而产生所需的能量传递。于是，先有技术提供直接控制磁通量的电磁系统的能力受到限制。

[0006] 在要求最终控制由系统的一个组件加到所述系统另一个组件的力的电磁系统中，先有技术缺乏适当的磁通量控制系统尤为明显。在这样的系统中，由所述系统产生的实际的力与由所述系统的受激组件所建立的磁通量有关。但是，如上所述，由于先有技术不能直接和精细地控制磁通量，所以它无法精细地控制由这样的系统所产生的力。

[0007] 先有技术没有能力精细地控制一个电磁系统中建立的力，这在必须精密控制系统中至少一个组件的运动的应用中显得特别突出。这样的应用的一个示例是摩擦或振动焊机，它用来驱动一个准备焊接的热塑零件，相对于另一个热塑零件，发生线性的、轨道的、旋转的或任意的振动运动，使这两个零件沿着它们待焊接的表面强制接触，使这些零件彼此相对运动，引起摩擦，沿着它们的界面加热这些零件，并停止运动时，零件被冷却，彼此焊接在一起。

[0008] 摩擦焊机特别适用于借助线性、螺旋或轨道振动力，在零件内引起摩擦生热，焊接

热塑零件。待焊接面的分界面处的摩擦生热使这些零件在其界面处熔化，并在冷却时粘结在一起。尽管产生摩擦生热的振动力可以通过机械啮合装置建立，但是一般都采用电磁系统产生所需的受控运动。

[0009] 市场上可以买到若干种用电磁或液压驱动的在线性振动模式下工作的摩擦焊机。但是，这些摩擦焊机的运动不理想。由于焊接部件这些线性的或从一侧到一侧的运动，焊接材料界面处的摩擦力是平移的，并且每当焊接部件调转方向时速度降低到零。当部件处于零速度时，不产生热，由于摩擦焊接是阻力过程，产生的热与界面处部件的阻力和相对速度的均方根的乘积成正比。

[0010] 此外，许多线性运动焊接系统采用电磁系统或利用已知的“斯柯特双极分接”（“Scott Tee”）磁路的驱动器把三相电功率转变为单相机械运动。在这样的系统中，因为系统驱动器部件的电磁链接性质，难以精确地在所有方向上控制可动件的运动，并且难以限制可动件零速的时间间隔。因此，已经研制出摩擦焊接的替代运动和控制器，它力求减小零速度分量或将其减到最小，并简化控制电路。

[0011] 旋转焊接就是这样一个替代方案，其中焊接部件绕轴旋转，而旋转力、而不是线性运动在界面上产生摩擦生热。但是，旋转力与离开旋转中心的半径距离成正比，因而不论部件的速度还是所造成的加热，根本就是不均匀的。此外，旋转焊接一般限于被焊接的部件具有圆形的几何形状的应用场合。

[0012] 第二个替代方案是以电磁方法使焊接部件产生轨道运动。在轨道运动期间，零件被摩擦时部件的速度保持恒定，以此产生的摩擦热量与线性运动时一样，但是所需的力较小，而且焊接部件相对位移较小。

[0013] 尽管轨道焊接加热上有优点，但是有些零件不宜轨道运动焊接，而宜于线性或旋转运动焊接。因而，研制出了由电磁驱动的，既能产生线性运动又能产生旋转运动的摩擦焊机。在 Snyder 的美国专利 No. 5, 378, 951 中公开了一种这样的摩擦焊机。这些摩擦焊机的电磁驱动系统在某种程度上类似于电磁电动机。

[0014] 在这样的系统中，3 个耦合的电磁线圈等距地环绕焊机的圆周定位，设置在与运动平面平行的平面上。这些耦合的电磁线圈在电气上不是进行△形连接，就是进行 Y 形连接，基本上形成一个轨道电动机定子部件。作为单个的磁性材料体单独形成的三角形电枢或转子部件相对于定子部件定位在中心，使得三角形电枢的每个面都与电磁线圈相邻。电枢由连接到巨大的静止框上的柔性弹簧支持系统保持在水平的轨道平面上。电枢的轨道运动是由加到耦合的电磁线圈的受控的三相 AC 电流造成的，后者在电枢上产生与所产生的磁通量成正比的力。这种电枢运动可以分解为位移、速度和加速度矢量，在振幅上与两倍 AC 电力线频率的正弦和余弦成正比。电枢的线性运动通过加上第二个轨道运动电动机或通过把单个轨道电动机的每一个耦合的电磁线圈分成两个部分并选择性地向并联或串联组合的不同部分施加电流来产生。

[0015] 利用耦合的电磁线圈产生轨道运动有几个严重的缺点。首先，利用耦合电磁线圈降低了系统的整体性能，因为在任何一个方向上产生的力总是由于磁路中的磁通量通路的耦合，而在相反方向上产生对抗力分量。其次，所述系统没有能力产生既非轨道又非线性的运动，亦即产生纯任意运动。当系统需要补偿不平均的质量分布，或要求随机轨道时，需要产生焊接部件的任意运动。

[0016] 最后,使电枢产生轨道或线性运动的控制系统变得复杂。当耦合的电磁线圈用在轨道电动机上时,系统内的磁通量被限制在总和为 0。若除此之外 AC 相电流也被限制在总和为 0,则在磁力系统中便没有足够的自由度来产生任意的力,以产生任意的运动。但若相电流并不被限制在总和为 0,则在磁力系统中便有足够的自由度以产生任意力,但是要求连续的磁通量操作来产生这些任意力。

[0017] 这样的系统中跨越电磁线圈和电枢相邻面之间的气隙的磁通量随所有三个相电流和非线性磁性元件而变。绝不会有未用的或未激励的电磁线圈。这限制了在这样的系统中使用任意形式的精细的磁通量控制的能力。

[0018] 本发明就是要解决先有技术的这些问题和其他限制。

## 发明内容

[0019] 根据本发明的一个方面,提供一种用于电磁执行器的力控制系统。所述执行器具有带磁芯的静止件,可动件和至少一个相线圈,所述相线圈设置成当相线圈受激励而将力作用在可动件上时,在所述磁芯上建立磁通。力控制系统包括:观测器,用于输出代表可动件瞬时位置和速度的信号;以及位置控制器,用于接收观测器的输出和代表所需位置和所需速度的信号。位置控制器把观测器的输出与所需位置和速度信号进行比较,产生位置和速度误差信号。位置控制器还根据所述位置和速度误差信号产生以所需速度把可动件定位在所需位置上所需要的力命令信号。磁通量控制器接收力命令信号,并把力命令转变为磁通量命令信号,而磁通量控制器根据磁通量命令信号产生相位激励信号。在本发明的某些实施例中,从力命令信号消除位置分量,结果只控制可动件的速度。

[0020] 根据本发明的另一种用于电磁执行器的力控制系统,所述执行器包括具有磁芯的静止件、可动件和相线圈,所述相线圈设置成当所述相线圈受激励时在所述磁芯上建立磁通、以便把力作用在所述可动件上,其中,作用在所述可动件上的力与所述磁通的量值成正比,所述力控制系统包括:磁通量观测器,它具有输入端和输出端,所述输入端连接到所述相线圈,所述磁通量观测器对加到所述相线圈上的电压进行低通滤波、估计所述相线圈中的磁通量并在输出端提供代表估计的磁通量的信号;以及磁通量控制器,它接收力命令信号和所述磁通量观测器的输出信号,当所述磁通量命令信号比代表估计的磁通量的信号至少大一个预定量时所述磁通量控制器提供相激励信号以便激励所述相线圈以便增大所述相线圈中的磁通量,而当代表估计的磁通量的信号比所述磁通量命令信号至少大一个预定量时、激励所述相线圈以便减小所述相线圈中的磁通量。

[0021] 本发明还涉及一种电磁执行器,它包括:静止的外组件,它定义一个腔,所述静止的外组件包括磁芯;相线圈,它设置成当所述相线圈被激励时在所述磁芯内建立磁通量;可动件,它设置在由所述静止的外组件限定的所述腔内、使得在所述磁芯内建立的所述磁通量把力作用在该可动件上;磁通量观测器,它具有输入端和输出端,所述输入端连接到所述相线圈,所述磁通量观测器对加到所述相线圈上的电压进行低通滤波、以便估计所述相线圈的磁通量、并在所述输出端提供代表估计的相线圈的磁通量的信号;以及磁通量控制器,它接收磁通量命令信号和所述磁通量观测器的所述输出信号,所述磁通量控制器提供相激励信号、以便当所述磁通量命令信号比所述代表估计的相线圈的磁通量的信号至少大一个预定量时激励所述相线圈以便增大所述相线圈中的磁通量、而当所述代表估计的相线

圈的磁通量的信号比所述磁通量命令信号至少大一个预定量时激励所述相线圈以便减少所述相线圈中的磁通量。

[0022] 根据本发明的另一个方面，电磁执行器的力控制系统包括具有输入端和输出端的磁通量观测器，其输入端连接到相线圈。磁通量观测器对施加于相线圈的电压进行低通滤波，以便估计相线圈的磁通量，并在输出端提供代表磁通量估计值的信号。例如，磁通量观测器可以对  $V_n - I_n * R_n$  进行低通滤波，式中  $V_n$  是相线圈的电压， $I_n$  是相线圈电流，而  $R_n$  是相线圈电阻。磁通量控制器接收磁通量命令信号和磁通量观测器的输出，并提供相激励信号，以便当磁通量命令信号比估计磁通量信号至少大预定的量时激励相线圈，增大相线圈中的磁通量，并当磁通量反馈信号比磁通量命令信号至少大预定量时，激励相线圈来减少所述相线圈中的磁通量。

[0023] 更进一步，13，公开了一种电磁执行器，它包括限定一个腔并包括磁芯的静止的外组件。相线圈设置成当相线圈被激励时在磁芯内建立磁通量，而可动件设置在由静止组件限定的腔内、使得在磁芯内建立的磁通量把力作用在所述可动件上。磁通量观测器的输入端连接到相线圈的输入端，磁通量观测器对加到相线圈的电压进行低通滤波，以便估计相线圈的磁通量，并输出代表估计磁通量的信号。磁通量控制器接收磁通量命令信号和磁通量观测器的输出。根据这些信号，磁通量控制器提供相激励信号，以便当磁通量命令信号比估计磁通量信号至少大预定量时激励相线圈、增大所述相线圈中的磁通量，而当磁通量反馈信号比磁通量命令信号至少大预定量时激励相线圈、以便减少相线圈中的磁通量。

[0024] 在某些示范性实施例中，静止的外组件包括多个基本上相同的磁退耦的 E 型磁芯，每个 E 型磁芯限定一个中心臂和两个辅助臂。每一个 E 型磁芯的中心臂绕有相线圈、使得向给定的相线圈施加电能时将在相应的 E 型磁芯内建立磁通量。例如，这样一个系统可以包括两个或 4 个相系统。

## 附图说明

- [0025] 参考附图阅读以下的详细描述时将明白本发明的其他目的和优点。附图中：
- [0026] 图 1 举例说明根据本发明的某些方面的新型磁通量控制系统；
- [0027] 图 2A 和 2B 更详细地举例说明图 1 中所示磁通量控制系统的一个示范性实施例；
- [0028] 图 2C 举例说明归零误差控制电路的示范性实施例；
- [0029] 图 3A 一般地举例说明可以用于图 1 控制系统的开环磁通量观测器的示范性实施例；
- [0030] 图 3B 一般地举例说明利用低通滤波器提供相应于电磁系统中磁通量的信号的电路；
- [0031] 图 4 一般地举例说明可以与图 1 的磁通量控制系统配合使用的电磁执行器；
- [0032] 图 5 一般地举例说明根据本发明所传授的某些技术构造的实现所需的力到磁通量变换的力控制系统的一个示例；
- [0033] 图 6A-6D 通过使用伪码块一般地举例说明可以通过利用程序微控制器或微处理器实现的力到磁通量变换的示范性形式；
- [0034] 图 7A 一般地举例说明图 4 执行器的不同相线圈的表示，所述相线圈应当被激励而产生关于 X 和 Y 的所需力因数的力；

- [0035] 图 7B 一般地举例说明一组功能块, 当实现时, 产生相应的磁通量命令, 以便实现图 7A 所反映的磁通量到力的变换;
- [0036] 图 8A-8C 一般地举例说明用于力到磁通量控制器的功能块, 可用以产生可动件的线性运动;
- [0037] 图 9 提供一种根据本发明传授的某些技术构造的示范性位置控制系统的高层方框图, 它可以用来构造振动焊接装置;
- [0038] 图 10A 一般地举例说明可以用来实现用于图 9 的装置的位置控制器的功能块;
- [0039] 图 10B 举例说明类似于图 10A 的功能块, 它经过调整反映在采样的基础上运行的控制器;
- [0040] 图 11A 一般地举例说明可以用来实现根据本发明传授的某些技术的位置命令产生器的一组示范性功能块;
- [0041] 图 11B 举例说明类似于图 10A 的位置命令发生器, 所述位置命令发生器在采样的基础上工作以便响应采样的输入信号产生位置命令信号;
- [0042] 图 12A-12D 一般地举例说明图 9 中所示类型的位置控制器在不同操作方式下的操作;
- [0043] 图 13 一般地举例说明根据本发明传授的某些技术构造的 QD 控制系统的一种形式;
- [0044] 图 14A-14D 一般地举例说明可以用来实现图 13 的示范性 QD 控制器的功能块。

### 具体实施方式

[0045] 尽管本发明容许各种修改和替代形式, 但是其特定的实施例已经通过附图中的实例示出并且在本文中进行了详细说明。但是, 显然, 这里对特定实施例的说明的目的不在于把本发明限制在所公开的特定形式, 而是相反, 旨在覆盖所有在后述权利要求书所限定的精神和范围的变化、等当物和替代方案。

[0046] 本发明的详细描述

[0047] 下面描述本发明的说明性的实施例。为清晰起见, 在本说明书中并未描述实际实现的所有特征。当然下面将指出, 在任何一个这样的实施例的研制中, 都必须作出若干实现所特有的决定, 以便达到研制者的特定目的, 诸如遵从与系统有关及与商业有关的限制, 这依实现方案的不同而不同。此外, 应该意识到, 这样的研制的努力会是复杂的和耗时的, 但这是从本公开得到好处的本专业的普通技术人员的例行做法。

[0048] 现将注意力转向附图, 特别是图 1, 其中显示一种根据本发明某个方面构造的新型的磁通量控制系统 10。一般说来, 新型系统 10 包括磁通量控制器 12, 它在输入端接收磁通量命令 13 并提供相线圈激励信号 14 作为输出。通过适当的装置向电磁系统 15 提供相线圈激励信号 14。磁通量观察器 16 向磁通量控制器 12 提供与所述电磁系统 15 的磁通量对应的反馈信号。一般说来, 磁通量控制器 12 提供激励所述电磁系统 15 的相线圈激励信号 14、使得电磁系统 15 中的磁通量跟随磁通量命令 13。

[0049] 电磁系统 15 可以是包括至少一个相线圈和磁芯的任何电磁系统, 其中相线圈可以通过施加电功率(例如, 通过施加受控的电压和 / 或电流)来激励、以便在所述磁芯内建立磁通量。例如, 电磁系统 15 可以象带有绕在铁芯上的相线圈的铁芯电感这样简单, 或具

有各自绕在铁芯上的初级和次级绕组的变压器。

[0050] 相信本发明的所述磁通量控制器 10 对构成电磁执行器的电磁系统 15 具有特殊的用途,其中系统 15 的激励产生可动件的运动。例如,相信图 1 的磁通量控制系统对包括其上绕有一个或多个相线圈的主磁芯(或多个磁去磁芯)的电磁系统 15 具有特殊的可用性。在这样的实施例中,一般都装有可动件,当磁芯受激使得磁芯的激励引起可动件的运动时,可动件与磁芯相互作用。可动件可以是一块顺磁材料,诸如钢或一叠这样的材料的叠层,它以类似于磁阻电机的转子和定子的相互作用的方式与受激的磁芯相互作用。或者,可动件可以包括一个或多个永久磁铁(或电磁铁或者甚至感应线圈),它以类似于永磁电机的转子和定子之间的相互作用的方式与受激磁芯相互作用。尽管以下的讨论是在一个或多个特定的电磁系统 15 的上下文的情况下进行的,但是本专业的普通技术人员应该明白,所描述的磁通量控制系统 10 可以与若干种电磁系统 15 一齐使用,而且这里的讨论目的在于举例说明和解释本发明,并非要限制本文中提出的权利要求书的范围。

[0051] 图 1 中举例说明电磁系统 15,其中只具有单个相线圈。在电磁系统 15 包括多个相线圈的应用中,激励信号 14 可以采取激励矢量的形式,它包括用于每个相线圈的单独的激励信号。在这样的应用中,磁通量命令 13 可以采取磁通量命令矢量的形式,其中包括用于每个不同的相线圈的单独的磁通量命令。在这样的应用中,与每一个相线圈有关的磁通量可以单独地控制。为清晰起见,以下讨论的焦点首先集中在所述系统具有只包括一个相线圈的电磁系统 15 的前题下磁通量控制器 12 的结构和操作上。本专业的普通技术人员都会意识到,多相磁通量控制器 12 可以通过简单地复制这里描述的单相磁通量控制器来构造。

[0052] 图 2A 和 2B 较详细地举例说明磁通量控制系统 10 的一个示范性实施例。图 2B 举例说明用于激励电磁系统 15 的电驱动电路,而图 2A 举例说明为图 2B 的驱动电路提供控制信号的控制电路。下面将首先讨论图 2B 的驱动电路。

[0053] 在举例说明的实施例中,以绕在磁芯上的单个相线圈的形式说明电磁系统 15。所述相线圈有两个末端。相线圈的两个末端通过包括上开关器件 17、下开关器件 18、下回扫二极管 19 和上回扫二极管 20 的开关电桥连接到高压 DC 总线( $V_{HDC}$ )两端。开关器件 17 和 18 可以是任何适当的可控开关器件,诸如功率 MOSFET,双极结型晶体管(BJT),双极 FET(BIFET),绝缘栅双极晶体管(IGBT),金属氧化物半导体控制晶闸管(MCT),标准 FET 或可以通过施加控制信号加以控制的其他适当的器件。在举例说明的实施例中,上开关器件 17 受控制信号 SU 控制,而下开关器件 18 受控制信号 SL 控制。回扫二极管 19 和 20 可以是任何呈现类似二极管(例如,单向)电流特性的器件。

[0054] 一般说来,可以启动开关信号 SU 和 SL,以便产生三种开关状态:(i) 第一状态,其中上、下开关器件 17 和 18 都处于导通状态;(ii) 第二状态,其中只有一个开关器件处于导通状态;和(iii) 第三状态,其中没有一个开关器件处于导通状态。当开关信号 SU 和 SL 处于第一状态时,使得上、下开关器件 17 和 18 都变成导通状态,相线圈 18 便跨接在  $V_{HDC}$  总线两端,这样便使电流从  $V_{HDC}$  总线的正轨道(positiverail)( $+V_{HDC}$ )通过电磁系统 15 的相线圈流到  $V_{HDC}$  总线的地线。所述电流的流动将引起能量从  $V_{HDC}$  总线转移到电磁系统 15,从而增大所述系统 15 的磁通量。

[0055] 当开关信号 SU 和 SL 处于第二状态、使得开关器件 17 和 18 中只有一个变成导通状态、而另一个变成截止状态时,加到所述系统 15 两端的电压大致为 0。在这样的第二开关状

态下,相线圈中的任何电流都将通过导通的开关器件和回扫二极管中的一个“惯性滑行”。例如,若相线圈 15 中有电流,而信号 SU 和 SL 处于这样的状态,使上开关器件 17 导通,而下开关器件 18 截止,则相线圈中的电流从  $V_{HDC}$  总线的正轨道通过所述相线圈、通过上回扫二极管 20 “惯性滑行”回到  $V_{HDC}$  总线正轨道。在这样的环境下,相线圈两端的电压就是回扫二极管 20 的电压降加上器件 17 两端的电压。当下开关器件 18 导通,而上开关器件 17 截止时,将获得类似的基本上为 0 电压的状态。在这样的环境下,电流将通过下开关器件 18 和下回扫二极管 19 “惯性滑行”。当相线圈中的电流处于“惯性滑行”时,由相线圈建立的磁通量基本上保持恒定或略微减少。这样,电磁装置中的能量,因而其磁通量将基本上保持恒定或略微减少。

[0056] 当开关信号 SU 和 SL 处于第三状态,使上、下两个开关器件 17 和 18 都变成开路状态时,这种开关状态开始时相线圈中的任何电流都将继续流动,因为相线圈是电感元件,电流不能在瞬时降低到 0。但是,因为上和下开关器件 17 和 18 都处于截止状态,所以所述电流流动的路径是从  $V_{HDC}$  总线的地线通过下回扫二极管 19、通过所述系统 15 的相线圈、通过上回扫二极管 20 回到  $V_{HDC}$  总线正轨道。于是,在这个第三状态下,所述系统 15 的相线圈将以负的方式跨接在  $V_{HDC}$  总线两端、使得  $V_{HDC}$  总线的负电压加在相绕组两端。 $V_{HDC}$  总线的负电压加在相绕组两端的这种状态趋向于迅速驱动任何磁通量,从而使相线圈中的电流降到 0。于是,当 SU 和 SL 信号处于第三状态时,贮存在电磁系统 15 的能量便耗散或回到  $V_{HDC}$  总线,因而系统中的能量、因此其磁通量将降低。

[0057] 本专业的普通技术人员将会意识到,图 2A 和 2B 中说明的特定开关电路只是可以用来控制相线圈的激励的电路。其他开关电路,例如,带有 4 个开关器件利用全 H 桥的开关电路也可以采用。一般说来,任何开关电路都可以用来实现这里描述的能够控制相线圈的激励、使得所述系统 15 中的磁通量增大、保持恒定或减少的系统。

[0058] 在图 2A 和 2B 的实施例中,开关信号 SU 和 SL 都是由磁通量控制器 12 提供的。图 2A 提供示范性磁通量控制器 12 的简图。

[0059] 参考图 2A,所图解说明的磁通量控制器 12 包括求和节点 25,它在正输入端接收与所需的通量电平对应的磁通量命令信号 13,而在负输入端从磁通量观察器 16 接收与电磁系统 15 中磁通量对应的磁通量反馈信号。求和节点 25 把磁通量命令 13 减去磁通量反馈信号,求出随着实际磁通量和所需的通量之间的差值而变化的误差信号。当磁通量误差信号为正时,磁通量命令大于磁通量反馈,将需要增大电磁系统 15 中的磁通量,使所述磁通量等于磁通量命令。当磁通量误差信号为负时,磁通量反馈大于磁通量命令,将需要减少电磁系统 15 中的磁通量,使所述磁通量等于磁通量命令。来自求和节点 25 的误差信号首先用放大器放大,然后提供给激励控制电路 21。

[0060] 激励控制电路 21 产生开关信号 SU 和 SL,以便根据误差信号的幅度增大、减少或稳定电磁系统 15 的磁通量。

[0061] 激励控制电路 21 可以采取任何形式。例如,所述控制器可以利用传统的脉宽调制或脉冲频率调制的形式,以便控制相线圈的激励。或者,激励控制电路 21 可以采取这样的控制器形式、使得在误差信号为正时接通开关器件 17 和 18;而在误差信号为负时使两个开关器件都断开;当误差信号为 0 时,一个开关器件接通,而另一个断开。按照相控制器 21 的一个实施例,这样控制开关信号、使得误差信号被驱动为 0 并允许“惯性滑行”直至误差信

号落在受控的磁滞带 (band) 之外。这样的时间滞后控制器在这里称作“误差归零”或 RZE 控制。所描述的 RZE 控制器的优点在于,对于所需通量命令不能迅速改变并且可用功率大到足以迫使相对较快地跟踪的应用,它提供对磁通量命令信号的快速跟踪,使得磁通量基准跟踪中的“延迟”小于控制系统的一个采样周期。

[0062] 正如这里描述的,图 2C 中示出举例说明 RZE 控制电路的一个实施例的详细电路。一般说来,图 2C 的 RZE 控制器 21 包括上比较器 22A 和下比较器 22B,它们一齐建立两个相邻的不对称的中心约在零误差的磁滞带。每一个比较器只处理一种极性的误差。所述两个比较器的输出提供给反相器 23a 和 23b,而所述两个反相器的输出对应于 SU 和 SL 信号。

[0063] 一般说来,当来自放大器 26 的误差信号大而且为正 (指示有必要增大电磁系统的磁通量) 时,两个比较器 22a 和 22b 的输出均为低。假定上、下开关器件 17 和 18 都属于在正电压加到这些器件的控制栅极上时导通的类型,则比较器 22a 和 22b 的低输出经反相器 23a 和 23b 反相、以产生高电平 SU 和 SL 信号,于是把开关器件置于第一开关状态、使得电磁系统 15 中的磁通量趋向于增大。

[0064] 当来自放大器 26 的误差信号的幅度大而且为负时,两个比较器 22a 和 22b 的输出均为高。这些为高的信号将被反相器 23a 和 23b 反相,结果产生低电压 SU 和 SL 信号,使上、下开关器件 17 和 18 都截止,于是驱动电磁系统的电流 (因而其磁通量) 下降。

[0065] 当来自放大器 26 的误差信号处于大的正值和大的负值之间时,开关信号 SU 和 SL 信号的状态取决于与磁滞电压  $+V_H$  和  $-V_H$  相比的所述误差信号的幅度。在举例说明的实施例中,磁滞电压  $+V_H$  和  $-V_H$  的施加受触发器信号 T 控制,使得当 T(24a) 是逻辑高时,给上比较器 22a 的正输入端施加磁滞电压  $+V_H$ ,而且不给下比较器 22b 施加磁滞电压,而当 T(24b) 是逻辑低时,给下比较器 22b 施加磁滞电压  $-V_H$ ,而且不给上比较器 22a 施加磁滞电压。正如下面将要解释的,触发器信号 T 改变状态,以便控制磁滞电压  $+V_H/-V_H$  向比较器 22a 和 22b 的施加。

[0066] 假定存在这样的初始状态,即触发器信号为逻辑高,而且电磁系统 15 中的磁通量低于命令磁通量,使得来自放大器 26 的误差信号为大的正值,而且比较器 22a 和 22b 的输出均为低 (结果是逻辑高的 SU 和 SL)。在这样的状态下,所述系统 15 中的磁通量开始增大,于是,来自放大器 26 的误差信号开始缩小。在某一时刻,误差信号的幅度开始从大的正值向 0 缩小。在误差信号达到并通过 0 的时刻,下比较器 22b (其中没有磁滞反馈) 的输出将改变状态,于是造成信号 SL 从高向低转变。这使开关电路进入第二开关状态,使得电磁系统 15 中的电流惯性滑行,结果使磁通量保持恒定或略微减小。信号 SU 和 SL 状态的这种变化还使触发器信号 T 的状态发生变化,使得反馈电压  $-V_H$  加到下比较器。若磁通量减小到来自放大器 26 的误差信号降至磁滞值以下的点,则下比较器 22b 的输出将再次改变状态,结果信号 SL 从低变为高,于是再次把功率加到电磁系统 15 上,引起所述系统 15 中的磁通量增大,在误差信号处于  $-V_H$  和 0 之间时将出现斩波现象。

[0067] 假定存在第二组初始状态,其中触发信号为逻辑低,而且电磁系统 15 中的磁通量大于命令磁通量,使得来自放大器 26 的误差信号为大的负值,而且比较器 22a 和 22b 的输出均为高 (结果信号 SU 和 SL 为逻辑低)。在这样的状态下,系统 15 中的磁通量将开始缩小,于是来自放大器 26 的误差信号的量值将开始增大。在某个时刻,来自放大器 26 的误差信号量值将从大的负值增大至 0。在误差信号达到并通过 0 的时刻,上和下比较器 22a 和

22b 两者的输出都具有改变后的状态,于是造成信号 SU 和 SL 从逻辑低到逻辑高的转变。这将使所述开关电路处于第一开关状态,使得电磁系统 15 中的电流增大,使磁通量增大。信号 SU 和 SL 状态的这种改变也会使触发信号 T 发生状态变化,于是导致把反馈电压  $+V_H$  加到上比较器 22b 上。若磁通量增大到使来自放大器 26 的误差信号超过磁滞值的点,则上比较器 22b 的输出再次改变状态,导致信号 SU 从逻辑高改变为逻辑低。信号 SL 保持逻辑高,于是开关电路被置于惯性滑行的状态,使系统 15 中的磁通量保持恒定或略微下降,误差信号在 0 和  $+V_H$  之间时出现斩波现象。

[0068] 于是,如上所述,图 2C 的磁滞控制器可以控制电机系统 15 中的磁通量,使得磁通量:(i) 当磁通量比所需电平低一个负的磁滞量时,增大;(ii) 当磁通量比所需电平高一个正的磁滞量时,减小;而(iii) 当磁通量处于正的和负的磁滞量之间时,基本上保持恒定,或略微缩小。关于联系图 2C 描述的类型的磁滞控制器的结构和操作的其他细节,可以在 1996 年 6 月 25 日授予 Michael J. Turner 的题为“感性负载的控制”美国专利 No. 5,530,333 中找到。其全文附此作参考。

[0069] 从本公开受益的本专业的普通技术人员将会意识到,图 2C 所示的磁通量控制器 21 只是若干种可用以实现图 1 磁通量控制系统的磁通量控制器中的一种。

[0070] 再参考图 1,可以发现,在图解说明的磁通量控制系统 10 中,来自磁通量观察器 16 的反馈信号提供所述电磁系统 15 中磁通量电平的指示。磁通量观察器 16 可以采取以下形式:磁通量传感器(例如,高斯计);诸如霍尔效应薄膜器件等霍尔效应探测器;SQUID(例如,超导量子干涉器件);或利用例如给定线圈的磁通量曲线隙测量的磁通量计算器。

[0071] 对于这样的系统,其中电磁系统 10 的相线圈受激、使得存在一些固定的周期、在这些周期期间每个相线圈都经历一次 0 磁通量状态(亦即,每个线圈都有一段非 0 的时间间隔其中磁通量为 0),与每个线圈相关的磁通量可以用开环磁通量观察器估计,所述观察器在所述相线圈的已知的 0 磁通量时间间隔期间复位为 0。这样的开环观察器可以通过应用与线圈相关的磁通量和所施加的电压和线圈中的电流的已知关系提供磁通量的指示。已知关系反映在以下的公式 1 中:

[0072] 公式 1:磁通量 =  $[V_{phase\_n}(t) - i_{phase\_n}(t) * R] / Nt$  的积分

[0073] 式中: $V_{phase\_n}(t)$  是对应于相线圈电压作为时间的函数的信号; $i_{phase\_n}(t)$  是对应于相线圈电流作为时间的函数的信号; $R$  是与相线圈电阻对应的值;而  $Nt$  是相线圈的圈数。

[0074] 传统的开环积分器可以用来确定每个相线圈的近似磁通量。为了避免漂移问题,开环磁通量积分器可以在已知的 0 磁通量状态期间复位为 0,以便把积分器随时间积累的不确定性减到最小。积分器的复位可以或者按时基(在已知的时间间隔内出现 0 磁通量状态的地方)发生,或者积分器可以是简单的箱位积分器。当电磁系统 15 受激,使得在系统中只建立单极性磁通时,可以采用箱位于 0 的箱位积分器。

[0075] 图 3A 一般地图解说明开环磁通量观察器 30 的一个示范性实施例,它可以用于图 1 图解说明的控制系统 10。参考图 3A,示范性开环磁通量观察器包括箱位积分器电路 31,它接收等于 4 个输入电压信号之和的信号作为其输入。确定积分器电路 31 的输入的这 4 个电压输入信号,在图 3 中从顶到底分别为:(i)  $+V_{INTCP}$  电压,对应于与功率开关器件 17 和 18 操作有关的恒定电压降;(ii) 电压信号,对应于相电流 I 的量值;(iii)  $+V_{DC}$  信号,该信号

以可用开关控制的方式连接到反相器 31 的输入端 ; 和 (iv)  $-V_{DC}$  信号, 该信号以可用开关控制的方式连接到反相器 31 的输入端。 $+V_{DC}$  和  $-V_{DC}$  信号对应于以已知的方式对于与加到系统 15 的相线圈的高电压  $V_{HDC}$  相关的正和负电平的 DC 电压电平。一般地说,  $+V_{DC}$  和  $-V_{DC}$  信号按比例小于与高压 DC 总线相关的  $+V_{HDC}$  和  $-V_{HDC}$ 。

[0076] 在图 3A 的实施例中,  $+V_{DC}$  信号通过当 SU 和 SL 信号为逻辑低 (亦即, 当连接到相线圈的开关电路动作, 使  $+V_{HDC}$  总线加到相线圈时) 时导通的受控开关 32a, 连接到积分器 31 的输入端。类似地,  $-V_{DC}$  信号通过当 SU 和 SL 信号为逻辑高 (亦即, 当连接到相线圈的开关电路动作, 使  $-V_{HDC}$  总线加到相线圈时) 时导通的受控开关 32b, 连接到积分器 31 的输入端。图 31 的箱位积分器的输出是  $-1 * \text{磁通量}$  (信号被反相)。可以在箱位积分器的输出端用增益 = 1 的放大器来看磁通量估计值。在磁通量控制器误差放大器, 利用磁通量估计值的反相。误差放大器是求和放大器, 以磁通量基准和磁通量估计值作为其输入, 在其输出端得到 K 增益 (磁通量基准 - 磁通量估计值)。

[0077] 由于  $+V_{DC}$  和  $-V_{DC}$  与  $V_{HDC}$  总线信号之间已知的关系, 出现在积分器 31 输入端的是直接对应于加到相线圈的电压。这样, 加到积分器上的输入电压的积分便能产生直接对应于电磁系统 15 的磁通量的信号。所示电路具有箱位大于 0 的磁通量估计值输出。

[0078] 采用开关器件 32a 和 32b 以及  $+V_{DC}$  和  $-V_{DC}$  信号提供代表加到相线圈的实际电压的信号, 相信是有利的, 因为实际 DC 总线值的量值一般相当高 (几百伏或更高的数量级)。因此, 这要求采用大型和昂贵的组件来直接对加到相线圈的相当高的电压进行积分。通过利用图 3A 的方法, 可以利用成本较低、电压较低的器件来提供系统 15 中磁通量的准确示值。从本公开中得益的本专业的普通技术人员将会意识到, 加到相线圈上的实际电压可以用来产生积分器 31 的输入电压。或者, 可以使用利用相电压的一部分的搜索线圈并且直接从该线圈积分。

[0079] 在图 3A 的示范性电路中, 相电流加到电阻 33 上, 以便提供用来校正积分器 31 的关于线圈电阻的输入信号的电压。用于上述校正操作的电阻 33 的值可以用若干种方法选择。对于相对简单的校正系数, 电阻 33 的值可以选为代表在相关电磁系统 15 的预期的操作条件下相线圈电阻的估计值的不变的值。因为 R 会随着温度和其他操作因素而变化, 所以选出的 R 值将是每一个相绕组的实际 R 值的近似的估计值。若 R 值是通过利用热模型和电气测量或当前用来估计实际电阻的技术、诸如 DC 电压注入法实测 / 估计 / 计算的, 则电流补偿可以得到改善。

[0080] 再参考图 3A, 下面将指出, 信号 SU 和 SL 用来甚至通过所述驱动开关产生与实际上加到相线圈上的高压信号对应的低压信号, 用来推导电流校正因数的电流是实际的相电流 i, 而非开关电流。应该用实际相电流来提供比较准确的电流校正因数, 因为开关电流未必与相电流对应。在加到相线圈上的实际电压的估计值的实施例中, 尽管使用驱动开关信号和低压总线, 但是电流校正因数将在从与加到相线圈上的电压对应的电压减去电流校正因数之前仍须进行适当的缩放。

[0081] 正如联系图 3A 所描述的, 尽管可以采用真积分器来获得系统 15 中磁通量的估计值, 但在许多应用中, 可以采用比较简单的方法。具体地说, 当系统 15 中的磁通量是双极性零平均 (间断或连续) 时, 系统的磁通量可以通过简单地对加到相线圈上的电压 ( $V_iR$ ) 进行低通滤波 (或对类似于加到图 3A 的积分器 31 上的对应于相线圈电压的电压进行低通滤

波)进行近似的估计。利用低通滤波器获得的系统 15 的磁通量的这样的估计值在某些应用中是有利的,因为它把漂移和与某些积分器相关的随机游动问题减到最小。图 3B 一般地举例说明这样的方法,其中与相线圈电压相关的信号(它可以对线圈电阻进行校正)加到低通滤波器 34 上,以便提供一个与相线圈相关的磁通量的信号。所提供的信号还反映总是与驱动电压相反的在涉及双极性激励电流的应用中会改变符号的器件的电压降。

[0082] 当用低通滤波器代替积分器来估计给定相线圈的磁通量时,滤波器的时间常数应该高于与线圈磁通量激励的基频相关的周期。例如,若相线圈在 100Hz 基频(10ms 周期)下激励,则对于所述相线圈,低通滤波器的时间常数应该大致为 50ms 或更长。给定大约 5 : 1(或更大)的滤波器时间常数对电压基频的比率和每一个线圈电压的零平均电压,低通滤波器近似地积分线圈电压,提供线圈磁通量的有用的估计值。

[0083] 上面联系图 1-3B 描述的新型磁通量控制系统 10 及其各组件可以有利地用于各种不同的用途。例如,磁通量控制系统 10 可以用来控制诸如传统的感应电动机、通用电动机、开关磁阻电动机或永磁电动机或混合型电动机(例如,PM 或 SM)等旋转电机的磁通量。这里描述的新型磁通量控制系统还可以用于其中必须把通过磁芯的磁通量控制在一个预定的所需电平上的各种不同的标定仪器。这里描述的磁通量控制系统还可以用来控制电磁执行装置,其中可动件的运动通过控制穿过一个或多个顺磁磁芯的磁通量来控制。

[0084] 图 4 一般地举例说明可以与上面描述的新型磁通量控制系统 10 一齐使用的电磁执行器 40。一般说来,电磁执行器 40 包括静止的外组件 41 和定位在静止组件 41 所限定的孔内的可动件。在举例说明的实施例中,静止的外组件 41 包括 3 个基本上相同的磁去耦的磁通量发生器,包括 E 型磁芯 43A,43B 和 43C。每个 E 型磁芯包括一叠基本上相同的顺磁材料(例如,钢)的薄片,所述叠片结构形成具有中心臂和两个辅助臂的 E 型磁芯,其中辅助臂定位在中心臂的两侧。磁轭部分把中心臂与辅助臂连接在一齐。在举例说明的实施例中,对于每个 E 型磁芯,中心臂的宽度大于辅助臂的宽度。在一个实施例中,对于每个 E 型磁芯,两个辅助臂的宽度基本上相同,并大致等于中心臂的宽度的一半或略微小于一半。一般说来,用来构造开关磁阻电动机的定子磁芯所用的相同的构造技术可以用来构造 E 型磁芯 43A,43B 和 43C。

[0085] 环绕每个 E 型磁芯 43A,43B 和 43C 的中心臂定位的是相线圈。在所举例说明的实施例中,每个相线圈 A, B 和 C 具有相同的圈数,并以相同的方式形成,使得 3 个相线圈 A, B 和 C “对称”。

[0086] 每个相线圈是围绕它各自的 E 型磁芯的中心臂定位的,使得当电能加到相线圈上时,将在相线圈中建立电流,这将建立通过所述 E 型磁芯的磁通。E 型磁芯 43A,43B 和 43C 的相线圈 A,B 和 C(受激)时建立的近似磁通路径如图 4 的曲线所示。正如该图所反映的,3 个 E 型磁芯的磁通路径基本上相同,每个 E 型磁芯的磁通路径限定了通过中心臂的中心磁通路径和通过两个辅助臂的两个辅助磁通路径。

[0087] 再参考图 4,可以发现,3 个 E 型磁芯 43A,43B 和 43C 的布置是这样的、使得这些 E 型磁芯围出一个通常呈三角形的孔。定位在这个孔内的是基本上呈三角形的可动件 42。在举例说明的实施例中,可动件 42 包括一叠基本上相同的顺磁材料(例如,钢)薄片,尽管可以预见替代的实施例,其中可动件包括永久磁铁(感应线圈)或电磁铁。

[0088] 正如从本公司受益的本专业的普通技术人员将会意识到的,在图 4 的电磁执行器

40 中,这些 E 型磁芯中的一个的相线圈之一的激励将会在可动件上产生力,使可动件朝受激的 E 型磁芯运动。这是因为无论何时,只要相线圈受激,可动件趋向于向把受激的相线圈的磁阻减小到最小的位置运动。于是,若与 E 型磁芯 43A 相关的相 A 线圈受激,则可动件 42 趋向于向下朝 E 型磁芯运动,以便把受激 A 线圈的磁阻减到最小。

[0089] 在图 4 举例说明的实施例中,这样设置 3 个 E 型磁芯 43A,43B 和 43C、使得可动件的运动可以沿着两个自由度受到控制。例如,利用图 4 的 X,Y 参考系指示器,可以控制可动件使其在正和负两个 X 方向(第一自由度)、和在正和负两个 Y 方向上运动(第二自由度)上、以及沿着由 X 和 Y 点限定的任何路径运动。因此,使用 3 个 E 型磁芯为沿着两个自由度控制所述可动件作好准备。

[0090] 尽管图 4 的特定执行器允许可动件沿着两个自由度控制,本专业的普通技术人员将会意识到,E型磁芯的不同数目和安排可以用来控制沿着较多或较少的自由度的运动。例如,若要求执行器能够只沿着一个自由度(例如,只沿着正的和负的 X 方向)运动,则基本上呈矩形的可动件可以只与两个 E 型磁芯一齐使用。一般说来,当可动件的运动由可动件向受激线圈的磁阻减到最小的位置的趋向引起时,为了控制 N 个自由度,则要求有 N+1 个相线圈。

[0091] 在一个替代实施例中,永久磁铁或电磁铁设置在可动件上(因此,利用或者正的或者负的电流对一个线圈的激励可以沿着一个自由度、既能产生正的力又产生负的力),要控制 N 个自由度只需要 N 个线圈。

[0092] 再参考图 4 的执行器 40,可以发现,与 3 个 E 型磁芯 43A,43B 和 43C 相关的磁通路径是彼此独立的。换句话说,3 个举例说明的 E 型磁芯是“磁去耦”的。这个特性的一个优点是每个 E 型磁芯中的磁通量可以与其他 E 型磁芯中的磁通量无关地控制。另外,在图 4 的实施例中,与 3 个磁芯相关的相线圈 A,B 和 C 可以单独激励。换句话说,各相线圈是电气去耦的。于是,可以与其他相线圈电流无关地控制每个相线圈中的相电流。正如下面将要更详细解释的,这样与其他 E 型磁芯中的磁通量和电流无关地控制每个 E 型磁芯中的磁通量和电流的能力在许多方面是有利的。

[0093] 再参考图 4,可以看出,对于每个 E 型磁芯,作用在可动件上使可动件朝受激的 E 型磁芯运动的力,与通过所述 E 型磁芯中心臂的磁通量的平方成正比,而且一般对应于以下公式 2 :

$$[0094] \frac{1}{2 * \mu_0 * S} (\text{flux}^2)$$

[0095] 式中  $\mu_0$  是对应于空气的导磁率的常数,S 是对应于与可动件 42 表面平行的 E 型磁芯中心臂截面积的值。flux 是与感兴趣的 E 型磁芯中的磁通量对应的信号。磁通量的值可以由以上联系磁通量观察器 16 的描述的类型的磁通量观察器提供。

[0096] 利用矩阵表达式,3 个 E 型磁芯 43A,43B 和 43C 中的磁通量和作用在可动件上趋向于使可动件朝 E 型磁芯 43A,43B 和 43C 的运动的力之间的关系可以用矩阵公式 1 表达:

$$[0097] FA \quad \quad \quad 100 \quad \quad \text{flux\_A}^2$$

$$[0098] FB = (1/[2 * \mu_0 * S]) * 010 * \text{flux\_B}^2$$

$$[0099] FC \quad \quad \quad 001 \quad \quad \text{flux\_C}^2$$

[0100] 式中 FA,FB 和 FC 代表趋向于使可动件 42 分别朝 E 型磁芯 43A,43B 和 43C 中心臂

运动的力,而 flux A, flux B 和 flux C 代表相应的 E 型磁芯中实际的或估计的磁通量。

[0101] 通过简单的几何计算,作用在可动件上的力可以利用矩阵公式 2 从 FA,FB 和 FC 坐标转换为 X 和 Y 坐标中的力:

$$[0102] \quad FX = 0 \quad \text{Sqrt}(3)/2 - \text{Sqrt}(3)/2 * FA; FA, FB, FC \geq 0$$

$$[0103] \quad FY = -1/2 \quad 1/2 \quad FB$$

$$[0104] \quad \quad \quad \quad \quad FC$$

[0105] 从矩阵公式 No. 1 和 2 可以意识到,对于在相应参考系(例如,FX 和 FY)的项中的给定的任意所需的力,能够产生所需的力的 flux\_A, flux\_B 和 flux\_C 的解,数目相当大,实际上潜在的数目无限。另外,因为图 4 的 E 磁芯和执行器 40 的相线圈的去耦性质,所以不存在使这些潜在的无限的解中的任何一个变成非法的限制。这样,因为图解说明的执行器的性质,可以选择 flux\_A, flux\_B 和 flux\_C 的最优解。一旦选择所需的通量解,即可利用上面联系图 1-3A 描述的类型的磁通量控制系统 10 加以实现。一般说来,将要求单独的磁通量控制系统 10,来控制 3 个 E 型磁芯 43A, 43B 和 43C 中每一个中的磁通量。

[0106] 一般说来,用于把所需的任意 X、Y 力转换为产生所述力所需的磁通量 flux\_A, flux\_B 和 flux\_C 值的一种“力到磁通量”的最优解或转换,将是这样的解,它把净系统磁通量减到最小,从而使建立所述磁通量所需要的能量减到最小。这样的解一般提供一种用于建立所需的力的能量效率高的途径。另外,对于许多电磁执行器而言,将存在适当的力到磁通量的转换,它要求执行器这样操作、使得在执行器的一个或多个磁芯中建立间断的单极性的磁通量。这样的间断的磁通量操作允许用上述有利的开环磁通量观察器。图 4 举例说明的新型电磁执行器的一个优点是最优的力到磁通量转换要求这样操作执行器、使得在执行器操作过程中在 3 个 E 型磁芯 43A, 43B 和 43C 中建立这样的间断的单极性磁通。

[0107] 给定系统的最优的力到磁通量转换可以由以下推导出来:

[0108] (i) 在与不同执行器元件(例如,E 型磁芯)相关的力和与这些执行器元件相关的磁通量之间建立关系(例如,决定由矩阵公式 1 反映的关系);(ii) 在给定的参考系中(例如,X、Y)所需的力和与不同的执行器元件相关的力之间建立关系(例如,确定由矩阵公式 2 反映的关系);和(iii) 根据在给定的参考系内所需的力解执行器元件的磁通量,并选择作为最小标准解的解。尽管任何时候最小标准解均可采用,但是已经发现选择最小 Euclidean 标准解作为所述力到磁通量的解或转换是有利的。最小 Euclidean 标准解的概念对于本专业的普通技术人员是理解的,并且 William L. Brogen 在其所著“Modern Control Theory(现代控制理论)”第 166 页作了一般的讨论。

[0109] 一旦为给定系统建立所需的力到磁通量转换,即可在实践中通过力控制系统加以实现。力控制系统的这样一个示范性实施例举例如图 5。

[0110] 参考图 5,图解说明力控制系统 50,它包括图 4 中图解说明的类型的执行器 40,由磁通量控制器 12' 激励,并作为输入接收所需通量命令,flux\_A\_cmd, flux\_B\_cmd 和 flux\_C\_cmd 以及反馈信号 flux\_A\_est, flux\_B\_est 和 flux\_C\_est。所述磁通量估计命令由磁通量估计器 16' 提供,它可以逐个相线圈地采取上面联系图 1 磁通量观察器 16 描述的任何形式的磁通量观察器。磁通量控制器 12' 在比较器 19' 处逐相地比较磁通量命令和磁通量估计,在放大器 26' 处放大误差信号,并通过激励控制电路 21' 产生适当的相线圈激励信号。控制器 12' 的构造可以逐相地遵循上面联系图 1 磁通量控制器 12 提供的描述。图 5 中未

示出激励相线圈 A, B 和 C 所需的驱动线路, 不过对从本公开中受益的本专业的普通技术人员这是显而易见的。

[0111] 连接到磁通量控制器 12' 的是力到磁通量控制器 51, 它接收给定的参考系 (图 5 中的 X、Y 参考系) 内的所需力命令作为其输入, 并在其输出端提供以 flux\_A\_cmd, flux\_B\_cmd 和 flux\_C\_cmd 表示的适当的磁通量命令。磁通量控制器 12' 以类似于前面联系图 1 的磁通量控制器 12 描述的方式接收磁通量命令并按照所述磁通量命令行动。

[0112] 尽管在图 5 举例说明的实施例中力到磁通量控制器 51 可以只由模拟电路构造, 但是力到磁通量控制器 51 包括数字电路, 诸如微处理器或微控制器, 后者适当编程以便实现所需的力到磁通量的转换。用数字电路构造力到磁通量控制器可能是有利的, 其中力到磁通量转换可以通过数学关系轻易地实现, 它容易用数字电路实现, 而且其中利用数字电路可以容易地改变力到磁通量转换。此外, 当利用数字电路实现力到磁通量控制器 51 时, 输入的力命令可以是数字的或模拟的。若为模拟的, 则将要求某种形式的模数转换, 把力命令转换成适当的数字值。类似地, 采用数字力到磁通量控制器 51 时, 所需的磁通量命令若为数字信号, 则若采用模拟磁通量控制器 51, 则可能需要转换为模拟信号。数字的力到磁通量控制器 51 的构造和编程将在从本公开中受益的本专业的普通技术人员的能力范围内。

[0113] 通过采用伪代码块, 图 6A-6D 图解说明力到磁通量控制器 51 的一种示范性形式, 它可以利用编程的微控制器或微处理器实现。图 6A-6D 图解说明的控制器实现的力到磁通量转换相当于图 4 的执行器 40 的最小 Euclidean 标准解。受益于本公开的本专业的普通技术人员会意识到, 尽管控制器 51 是用离散的伪代码功能块描述的, 但是所述控制器可以通过一种或多种编程的处理器、模拟电路或两者的组合实现。

[0114] 参考图 6A, 力到磁通量控制器 51 的一般操作分成 3 个高层功能块 60, 61 和 62。功能块 60 总体标记为 FXY\_to\_FABC, 接收以给定的参考系 (这里是 XY 参考系) 表示的所需力命令, 并把力命令转换为与执行器 40 的物理配置 (这里是 E 型磁芯 43A, 43B 和 43C 的配置) 相适应的力命令。功能块 61 接收以执行器 40 的配置表示的力命令, 并将这些力命令转换成与执行器 40 的相线圈对应的磁通量命令。功能块 62 是任选功能块, 并非对控制器 51 的所有实现都是必要的, 它从功能块 61 接收磁通量命令, 改变这些命令, 以保证在有限的时间间隔内使每一个磁通量命令均为 0。“磁通量调零”块 62 的使用保证了执行器 40 内的磁通量是间断的, 因而允许使用上面联系磁通量观察器 16 所描述的磁通量观察器的某些有利形式。每一个功能块都将在下面详细讨论。

[0115] 图 6B1-6B4 举例说明功能块 60 的结构和操作, 它把以 FX 和 FY 形式表示的输入力命令转换为以可直接由执行器 40 产生的 FA, FB 和 FC 力形式表示的力命令。在举例说明的实施例中, 功能块 60 首先用 FX 和 FY 命令在功能块 63A, 63B 和 63C 处推算 6 个中间控制信号 F\_a1, F\_a2, F\_b1, F\_b2, F\_c1 和 F\_c2。功能块 63A, 63B 和 63C 每一个都基本上把 FX 和 FY 命令乘以 2X2 状态矩阵, 后者逐个相线圈地实现矩阵公式 2 每一个可能的分块的正或负的逆阵。然后从可能的解中选择适当的解。在图 6B2, 6B3 和 6B4 中分别图解说明由功能块 63a-63c 使用的 2X2 状态矩阵。每个功能块 63a, 63b 和 63c 提供两个输出力值, 因为矩阵公式 2 的逆矩阵的实现将为每个 FA, FB 和 FC 产生两个解。用功能块 64a, 64b 和 64c 选择用于所述系统的适当解。

[0116] 再参考图 6B1, 每个功能块 64a, 64b 和 64c 都接收两个来自与其相关联的功能块

63a, 63b 和 63c 的力解答作为其输入, 所述力解答中至少一个是正的。功能块 64a, 64b 和 64c 首先通过把相应的中间力命令调整到 0 来消除所有负的力解答, 然后从两个调整后的力命令选择较大者。在图 6B1 的特定实施例中, 功能块 65 把从功能块 64a, 64b 和 64c 选出的力命令限于峰值, 以便产生每个相线圈的限幅的力命令 FA, FB 和 FC。设想了几种实施例, 其中由功能块 65 实现的限幅函数被取消了或者作为某些其他系统参数的函数实现。

[0117] 再参考图 6A, 一旦由功能块 60 产生 Fa, Fb 和 Fc 命令, 这些命令便由功能块 61 处理, 以便产生磁通量命令 flux\_A\_volts, flux\_B\_volts 和 flux\_C\_volts。在图 6C 中较详细地图解说明功能块 61。功能块 61 的操作代表每一个相线圈的矩阵公式 1 的有界 ( $> 0$ ) 逆矩阵的直接实现。具体地说, 把任何负的 Fa, Fb 和 Fc 命令调整到 0, 因为执行器 40 无法产生负力。通过把给定相的调整后的力命令的平方根乘以对应于下式的恒定值, 从调整后的力命令 Fa, Fb 和 Fc 确定每个相线圈的所需的通量

$$[0118] \quad \sqrt{2\mu_0 S}$$

[0119] 见上面的公式 2。功能块 61 的输出是磁通量命令信号 flux\_A\_volts, flux\_B\_volts 和 flux\_C\_volts。

[0120] 在图 6A 特定的实施例中, 来自功能块 61 的磁通量命令加到磁通量调零功能块 62 作为输入, 所述磁通量调零功能块 62 保证磁通量命令在有限的时间间隔内为 0。对大多数应用而言, 这种磁通量调零功能块的使用是不必要的, 而只对线性 X 运动才是重要的。功能块 62 的精确形式将随着数字力到磁通量控制器 51 是在采样的基础上还是在连续的基础上工作而略有改变。图 6D1 举例说明用于数字控制器的功能块 62 的示范性结构, 它定期地对不同的控制参数进行采样。图 6D2 举例说明用于连续操作的控制器 51 的类似功能块 62'。

[0121] 同时参考图 6D1 和 6D2, 功能块 62 和 62' 接收磁通量命令 flux\_A\_volts, flux\_B\_volts 和 flux\_C\_volts, 然后在图 6D1 的功能块 66a, 66b 和 66c 中和在图 6D2 的功能块 66a', 66b' 和 66c' 中, 产生相当于在给定时间间隔内磁通量命令信号的移动 (running) 平均的平均磁通量命令信号。确定这些平均磁通量命令值的不同方法构成图 6D1 所反映的采样控制器和图 6D2 所反映的连续控制器之间最重大的差异。具有适当 time 常数的数字的或模拟的平均滤波器的任何形式均可采用。

[0122] 实际的磁通量命令和平均磁通量命令都提供给功能块 67。功能块 67 把实际的磁通量命令和平均磁通量命令的一部分加以比较, 若给定相的实际磁通量命令小于平均磁通量命令的一部分, 则调整所述磁通量命令, 使其为最小磁通量值。若给定相的实际磁通量命令大于平均磁通量命令的一部分, 则不调整所述磁通量命令。于是, 功能块 67 的输出构成来自力到磁通量控制器 51 的磁通量命令输出 flux\_A\_volts, flux\_B\_volts 和 flux\_C\_volts。参考图 5, 然后由磁通量控制器 12' 处理这些输出, 控制执行器 40 的磁通量。

[0123] 从本公开中受益的本专业的普通技术人员会意识到, 反映在图 6A-6D 的特定的力到磁通量转换只不过是可以用按照本公开传授的某些技术构造的力到磁通量控制器实现的力到磁通量转换的示例而已。例如, 一种替代的力到磁通量转换可以基于用 FX 和 FY 力命令描述的角度和包括执行器 40 的 E 型磁芯的物理配置。

[0124] 如上所述, 所述系统中磁通量的估计可以用低通滤波进行估计, 这比采用真积分器简单。再参考图 5, 在本发明的某些实施例中, 由力到磁通量控制器 51 输出的每一个磁通量命令都是 AC 零平均的。换句话说, 每隔一个的磁通量命令“脉冲”就被反相。然后在这

样的系统中,利用线圈电压减去线圈电流乘以线圈电阻 ( $V_n - I_n * R_n$ ) 的低通滤波作为估计的相磁通匝连数。

[0125] 图 7A 一般地举例说明,为了产生所需力矢量的关于 X 和 Y 的力,执行器 40 的哪些相线圈应被激励。基本上,图 7A “以窗口表示”哪些线圈将随着以包括 FX 和 FY 分量的矢量表示的所需力的方向改变而接通。在如前所述的这样的力到磁通量转换中,任何时候都只有两个相线圈受激励。参考图 7A,可以发现,对应于 30 度和 150 度之间角度的任何一个命令力都可以令 FA 力为 0 而通过 FB 和 FC 力的组合产生。类似地,其方向在 150 度和 -90 度之间的任何一个所需的力都可以不用 FB 力而由 FA 和 FC 力产生,而矢量方向介乎 -90 度和 30 度之间的任何一个所需力都可以不用力 FC,而由 FA 和 FB 力产生。

[0126] 图 7B 一般地举例说明用于产生适当的磁通量命令、以便实现由图 7A 反映的力到磁通量转换的功能块。首先,图解说明的功能块计算作为 FX 和 FY 命令的函数的适当的力的角度。然后利用所述角度,所述功能块确定所述角度属于图 7A 中的哪一类,并根据计算确定对所述类而言应该受激励的两个相线圈的适当的磁通量命令。然后把这些产生的磁通量命令加到所述磁通量控制器 12' 上,并如前所述地使系统运行。

[0127] 可以再设想一种替代的力到磁通量转换。例如,上面描述的特定力到磁通量转换出现在具有用来沿着两个自由度控制可动件运动的 3 个去耦的 E 型磁芯的执行器 40 的情况下。一种替代的实施例是可能的,其中执行器只包括两个为可动件的线性运动安排的 E 型磁芯。在这样的应用中,唯一的输入力命令是 FX(或 FY 命令)。还可以采用 4 个 E 型磁芯,并提供 FX 和 FY 命令。图 8A-8C 一般地举例说明用于力到磁通量控制器 80 的功能块,所述控制器可以用于 2 个 E 型磁芯的线性系统或者具有 4 个线圈,两个线圈为一组控制一个轴(自由度)。

[0128] 参考图 8A,所图解说明的控制器 80 接收力命令 FX,并产生两个(标识为 A 和 B 的)用于相线圈的磁通量命令作为输出。一般说来,功能块 81 首先把命令 FX 转换为对应于线性执行器的 FA 和 FB 力命令,然后功能块 82 把这些力命令转换为适当的磁通量命令 flux\_A\_volts 和 flux\_B\_volts。

[0129] 在图 8B 中提供功能块 81 的细节。一般说来,功能块 81 接收 FX 命令,若 FX 命令为负,则赋予 FA 0 值并赋予 FB 等于 FX 的值。反之,若 FX 为正,则功能块赋予 FB 0 值并将 FX 的绝对值赋予 FA。然后将 FA 和 FB 限制于峰值。功能块 81 把限幅后的 FA 和 FB 命令提供给功能块 82,后者确定适当的磁通量命令 flux\_A\_volts 和 flux\_B\_volts。

[0130] 图 8C 中更详细地示出功能块 82。参考图 8C,若力命令等于或小于 0,则功能块 82 基本上设置对应的磁通量命令,或利用公式 1 的逆变换计算适当的磁通量命令。然后把磁通量命令 flux\_A\_volts 和 flux\_B\_volts 加到适当的磁通量控制器,以便激励所述系统。

[0131] 上面结合图 5-8C 描述的力控制系统有几个优点是用于控制电磁执行器产生所需的力的已知系统一般无法获得的。例如,在已知控制系统中,用以获得所需的力的控制变量或者是加到相线圈上的电压或者是电流。这些系统固有地有局限性,因为若采用电压控制,则所产生的力是受控电压的非线性函数。这样的非线性函数,在实践上,难以实现或者代价高,而且不允许适应变化了的运行条件和 / 或制造允差。若采用电流控制,则系统是开环不稳定的,并且对于合理的可接受的性能,必须面对执行器磁芯的非线性特性的问题。其结果是,与电压控制系统一样碰到相同的非线性困难。

[0132] 采用这里描述的磁通量控制器显著地减少或消除与电压或电流控制系统相关的许多困难。这是因为当采用磁通量控制时,在每一个执行器元件每一个气隙两端产生的力与气隙中磁通量的平方成正比。于是,为了产生可以接受的控制,不必考虑磁性材料的非线性和电气动态中的非线性。这样,这里描述的力和磁通量控制系统可以用来实现比较简单和更加有效的控制系统,设计和实现起来都比较容易而且成本较低。此外,当如上所述地与简单的开环磁通量观察器结合时,磁通量控制可以导致极其有效和精细的系统。

[0133] 尽管图 5 的力控制系统允许有效地控制作用在执行器 40 可动件上的力,但是在许多应用中,要想控制的是可动件的运动(例如,可动件的位置 / 速度或轨道),而不是作用于其上的力。对于这样的应用,图 5 的系统可以通过添加位置 / 速度控制回路来加强,所述控制回路以这样的方式产生力命令  $FX$  和  $FY$ 、以便按所需的方式控制可动件的运动。上述类型的位置 / 速度控制系统用途很多。例如,这样的位置 / 速度控制系统可以用来构造电磁轴承以及摇动或移动装置。这样的位置 / 速度控制系统的一个特定的用途是在轨道焊机领域。这样的焊机一般通过驱动第一被焊接零件(例如,热塑零件),使之相对于第二被焊接零件作轨道运动,使得第一和第二零件的相对运动引起摩擦,沿着它们的界面加热零件,使之在相对运动停止时零件冷却而彼此焊接在一齐。

[0134] 在这样的焊机中,第一零件一般设置在支架上。第二零件类似地设置在支架上。固定这些零件,使之彼此沿着零件之间的界面强制啮合,并提供驱动,驱使第二零件沿着预定的重复的路径相对于第一零件运动,使这些零件沿着界面被摩擦加热,重复运动停止时零件便被焊接在一起。

[0135] 传统的轨道焊机能够这样驱动待焊接的第一零件运动、使得零件之间的相对运动被限制为或者线性运动或者轨道运动。在许多应用中,要求被焊接的零件作不同的和任意的相对运动,使被焊接的零件的相对运动能够与零件的形状密切匹配,而对焊机运动的这些限制使其在这些应用上受到限制。这样的“形状匹配”可以显著地增强所得焊口的强度。通过采用这里描述的位置 / 速度控制系统,可以构造一种能够在被焊接的零件之间建立任意的相对运动,包括被焊接零件的线性运动、轨道运动、旋转运动或任何任意的运动的焊接装置。本专业的普通技术人员会意识到,这里描述的位置 / 速度控制系统只是按照这里传授的技术可以构造的控制系统,而且可以控制其他特性或特性组合(例如,加速度、速度、位置或它们的任何组合)的一个示例而已。

[0136] 图 9 提供如上所述可以用来构造焊接装置的位置 / 速度控制系统一个示例的高层方框图。尽管以下讨论是针对焊接装置进行的,但是从本公开中受益的本专业的普通技术人员会意识到,所公开的位置控制系统可以用来控制其他应用中可动件的位置 / 速度。

[0137] 参考图 9,位置 / 速度控制系统 90 在许多方面与图 5 的力控制系统相同。具体地说,在虚线方框 50 内,位置 / 速度控制系统 90 包括图 5 力控制系统 50 的所有部件,而且它们全都象联系图 5 所描述的那样操作。因为所述系统的执行器 40 是大型振动焊机的一部分,所以执行器的可动件可以与适当的焊接角形部件(welding horn)或适当的焊接工具(未图解说明)结合。

[0138] 除包括力控制系统 50 的部件以外,位置 / 速度控制系统还包括两个附加的主要部件。首先,在图 9 的实施例中,由位置 / 速度控制器 91 产生力命令信号  $FX$  和  $FY$ 。位置 / 速度控制器 91 接收下列信号作为其输入:(i) 位置命令信号 92,它代表执行器 40 可动件所

需位置 / 速度 (或轨道) ; 和 (ii) 来自位置 / 速度观察器 93 的反馈信号, 它代表与执行器 40 可动件相关的当前的位置 / 速度或轨道信息。一般说来, 位置 / 速度控制器 91 把位置 / 速度命令与位置 / 速度反馈信息比较, 以便产生位置 / 速度误差信号, 并用这些位置 / 速度误差信号产生适当的力命令, 所述力命令趋向于把可动件带回位置 / 速度命令 92 指示的位置 / 速度、或者当提供轨道命令时、使其沿着轨道命令 92 限定的轨道运动。

[0139] 位置 / 速度控制器 91 可以根据可动件所需位置 / 速度和 / 或轨道的定义方式采取任何形式。在一个实施例中, 可以把位置 / 速度控制器 91 构造成根据 X、Y 参考系中可动件的位置和以 X、Y 表示的可动件的速度, 控制执行器 40 的可动件的位置和速度。在这样的系统中, 向位置 / 速度控制器 91 提供的两个输入位置命令将用 X\_cmd, X\_dot\_cmd(X 速度), Y\_cmd 和 Y\_dot\_cmd(Y 速度) 表示, 而来自位置 / 速度观察器 93(下面要更详细描述) 的两个反馈命令用可动件的实际或估计的 X 和 Y 位置和速度 (例如, X\_act, X\_dot\_act, Y\_act 和 Y\_dot\_act) 表示。

[0140] 类似于上述力到磁通量控制器 51, 位置 / 速度控制器 91 可以通过利用编程的数字处理器, 诸如微处理器或微控制器实现。在某些应用中, 位置 / 速度控制器 91 可以利用实现力到磁通量控制器的同一个编程处理器实现。还可以设想模拟实现。

[0141] 在操作中, 位置 / 速度控制器 91 从位置 / 速度命令发生器接收 X, X\_dot, Y 和 Y\_dot 命令信号, 并把命令信号与代表可动件实际或估计的位置和速度 (X\_act, X\_dot\_act, Y\_act, Y\_dot\_act) 比较。瞬时位置和速度命令与反馈信号的这个比较结果是产生 4 个误差信号 (eX, eY, eX\_dot 和 eY\_dot), 对应于命令信号和反馈信号之间的差值。然后可以把 4 个误差信号乘以可以针对每一种应用优化的适当的控制增益。然后把 X 误差信号 (eX, eX\_dot) 加在一起, 并把 Y 误差信号 (eY, eY\_dot) 加在一起, 产生以所需的速度把可动件定位在所需位置上所需的 FX 和 FY 命令信号。可以在提供给力控制系统 50 之前, 对 FX 和 FY 力命令进行带通滤波, 以便减少偏置和噪音含量。然后把滤波后的力命令信号 FX 和 FY 提供给力控制系统 50 的力到磁通量控制器 51。根据系统的寄生模式和其他因素, 滤波器和滤波操作可能是不必要的。

[0142] 在位置 / 速度控制器 91 的一个实施例中, 代表执行器 40 可动件的 X、Y 位置和速度的反馈信号是利用位置 / 速度观察器 93 产生的, 它包括与执行器 40 相对定位的传统的加速度计, 使之可以向控制器 91 提供 X、Y 加速度信息。在所述实施例中, 位置 / 速度控制器 91 利用低通滤波器推算出关于 X 和 Y 的位置和速度, 针对所有实践目的, 所述滤波器是频率高于 170Hz 的积分器。利用低通滤波器, 而不是纯积分器可以消除开环积分器的漂移和方差累积问题。图 10A 提供了用于实现这样一种位置控制器的示范性功能块。

[0143] 参考图 10A, 来自位置 / 速度观察器 93 的 X(d\_2\_x\_dt\_2) 和 Y(d\_2\_y\_dt\_2) 加速度计的加速度信号加到标识为 100X 和 100Y 的功能块上作为输入。采用数字控制器 91 时, 任何模拟加速度信号均须转换为数字值, 而所述数字值应加到控制器 91 作为输入。

[0144] 功能块 100X 和 100Y 分别包括传统的数学转换, 把加速度信号转换为关于 X 和 Y 的可动件速度估计值 (例如, X\_dot\_est 和 Y\_dot\_est)。然后把 X 和 Y 速度估计值分别加到功能块 101X 和 101Y 上, 它们把速度估计值转换为位置 / 速度估计值。转换的数学性质举例示于图 10A。X 和 Y 速度和位置估计值分别加到调整估计值信号的增益块 102X 和 102Y 和比率块 103X 和 103Y 上作为输入。然后在功能块 104X 和 104Y 处从 X 和 Y 位置和速度命

令信号减去估计的位置和速度信号，产生 X 和 Y 的位置和速度误差信号。功能块 105X 和 105Y 将 X 和 Y 误差信号组合在一起以便产生 FX 和 FY 信号，低通滤波器和增益乘法器组合 106X 和 106Y 对所述 FX 和 FY 信号进行修改以便产生 FX 和 FY 命令，用来控制上述系统。

[0145] 在替代实施例中，可能希望只控制速度，而不是控制位置和速度。参考图 10A 和 10B，在这样的速度控制系统中，在功能块 105X 和 105Y 中把加到位置误差信号 eX 和 eY 的增益项 Ksfbk\_x 和 Ksfbk\_y 设置为零，从而从 FX 和 FY 命令中去除位置控制分量。

[0146] 图 10A 的示范性位置 / 速度控制器可以用在这样的系统中，其中对来自加速度观察器 93 的加速度信息连续采样，并连续产生 FX 和 FY 命令。考虑一种替代实施例，其中控制器 91 的操作不是不变的，而是按采样信息运行。这样的采样控制器 91 的功能块示于图 10B。一般说来，图 10B 的控制器 91 类似于图 10A 的，只是滤波器和转换的数学性质已经作了调整，以便反映所述控制器的采样性质。

[0147] 在图 10A 和 10B 的示例中，位置 / 速度观察器 93 包括 X 和 Y 加速度计，而执行器 40 可动件的位置与速度估计由加速度计的输出推算。设想了一种替代实施例，其中采用传统的位置传感器（例如，接近传感器）来检测 X 和 Y 的位置方向。在这样的实施例中，可以利用诸如标准确定性观察器、积分误差观察器或卡尔曼滤波器观察器等降阶观察器来获得速度信息。一般说来，可以采用能提供关于执行器 40 可动件的位置和速度信息的任何形式的全阶 (full-order) 或降阶位置 / 速度观察器 93 来构造位置 / 速度观察器 93。在替代的实施例中，可以把拾取线圈与位置观察器配合使用。拾取线圈测量速度。

[0148] 在一个实施例中，可以取消位置 / 速度观察器 93，而能从执行器 40 本身电气特性获得有关执行器 40 可动件的位置和速度信息。在实施例中，这样激励执行器 40 的相线圈、使得在任何时间或在给定时间至少有一个相线圈不受激励，不受激励的线圈可以用作接近传感器。在这样的实施例中，可以用高频磁通脉冲激励所述不受激励的相线圈，并检测所得电流。所述电流的振幅与所述磁通量的气隙振幅具有直接的代数关系。检测气隙的振幅时，X 或 Y 的位置即可完全确定。

[0149] 不幸的是，当要求相线圈来提供具有 +30 度和 +120 度（见图 7）之间方向的力矢量时，只有 X 位置可以由不受激励的线圈确定。在这样的情况下，X 位置可以由估计的或实际的磁通量和电流信息确定。估计磁通量和电流之间的关系再次是直接的和代数的关系。在具有 4 个相线圈的系统中，可动件的位置完全通过对不受激励的线圈的电气特性的分析来确定。

[0150] 因为用于图 9 位置 / 速度控制系统中的力到磁通量转换消除了力产生机制中的非线性，故位置 / 速度控制器 91 所产生和所用的误差信号具有线性动态而所述控制系统的其余参数可以利用线性方法设计。任何传统的多输入多输出线性控制设计方法均可用来调整本系统，因此，设置所述系统的响应，诸如极点配置、LQG、鲁棒性等。对可动件位置和速度进行瞬时控制的能力在振动焊接的应用中是极其有利的。

[0151] 在一个实施例中，极点布局用来调整所述控制系统，在所述系统中，通过产生比例控制系统的 4 个控制增益来配置所述系统的闭环极点。尽管当采用这种形式的极点布局时，X 和 Y 命令之间将存在有限稳态误差和相位误差，但是可动件轨道的形状将不受影响。

[0152] 传统的振动焊接系统利用基于平均值的控制系统，其中系统的可动件受控制或者作圆形运动或者作椭圆形运动，并控制圆或椭圆的平均半径。当使用不对称焊接工具或可

动作遇到干扰时,这样的平均控制系统便无法足够迅速地进行补偿,以稳定系统。反之,这里公开的新型控制系统瞬时地控制可动件的 X 位置、Y 位置、X 速度和 Y 速度。另外,可以利用瞬时控制来抑制由工具的不对称和负载干扰造成的 X 和 Y 运动的耦合。

[0153] 当在静止参考系(例如, X、Y)内提供位置 / 速度命令时,可以把较缓慢的平均半径控制回路设置在瞬时控制回路周围,以保证零稳态误差。这样的外控制回路对保证甚至在过载状态下可动件跟随所需的轨道运动是特别有利的。一般说来,平均半径控制回路产生平均半径误差,这作为  $\pi$  (PI) 控制律控制器的输入提供。然后 PI 控制律消除任何稳态误差,尽管可能 X 和 Y 之间的相位误差仍旧存在。因为平均半径是直流变量,所以 PI 控制律控制器将会抑制恒定的负载干扰。PI 控制律控制器的输出加到命令半径信号上,以便把总的半径命令信号加大到比例瞬时命令信号。

[0154] 在图 9 图解说明的特定实施例中,输入的位置 / 速度命令以表达为 X 和 Y 位置和速度的执行器 40 可动件所需位置和速度的形式提供。在许多振动焊接应用中,可动件所需的运动无法对应于任意的 X 和 Y 命令,但是反而对应于趋向于使执行器 40 的可动件产生椭圆运动的 X 和 Y 命令。对于这样的应用,可以由新型位置 / 速度命令发生器产生 X 和 Y 位置 / 速度命令,所述发生器产生所需的椭圆轨道所需的 X 和 Y 位置 / 速度命令。这样的位置 / 速度命令发生器的输出端连接到位置 / 速度控制器 91 的输入端。

[0155] 图 11A 一般地图解说明可以用来实现示范性位置 / 速度命令发生器 110 的一组示范性功能块。参考该图,位置 / 速度命令发生器 110 接收定义执行器 40 可动件所需椭圆轨道的命令信号作为其输入。具体地说,位置 / 速度命令发生器 110 所接收的命令信号是:(i) 长轴命令 ( $r_{command}$ ), 对应于沿着 X 轴的所需椭圆轨道的长轴;(ii) 长轴对短轴比例命令或偏心命令 ( $ecc_{command}$ ), 定义沿着 X 轴的长轴与沿着 Y 轴的短轴的比率;(iii) 角度命令 ( $angle_{command}$ ), 定义要求轨道的长轴偏离 X 轴的角度移角;和(iv) 工作频率命令 ( $fc$ ), 定义可动件沿所需的椭圆路径来回移动的频率。

[0156] 参考图 11A,所描述的各种输入命令利用示于该图的适当滤波器 111,112,113 和 114 滤波。若如上所述地使用外半径控制回路,则滤波后的半径命令 ( $r_{filtered}$ ) 可以在求和节点 115 上利用半径误差校正值修改。然后在限幅块 116 上对修改后的半径命令 ( $r_{error\_total}$ ) 进行限幅,使之落入某个范围,限幅后的 r 命令加到椭圆转换块上。然后通过功能块 118,119a 和 119b 把输入工作频率命令转变为作为输入加到椭圆转换块 117 的时间改变角度值。把其他滤波后的输入信号 ( $ecc_{filtered}$ , $angle_{filtered}$ ) 直接加到椭圆转换块 117 上。

[0157] 椭圆转换块 117 接收以上注明的信号,并利用图 11A 提出的数学关系产生 X 和 Y 位置和速度命令 ( $X_{cmd}$ , $X_{dot\_cmd}$ , $Y_{cmd}$  和  $Y_{dot\_cmd}$ )。

[0158] 图 11A 举例说明可以用来实现位置 / 速度命令发生器 110 的功能块,它响应连续的输入信号而连续地运转。图 11B 举例说明可以用来实现位置 / 速度命令发生器 110' 的类似的功能块,它响应采样输入信号以采样方式工作以便产生位置 / 速度命令。正如从本公开中受益的本专业的普通技术人员会意识到的,位置 / 速度命令发生器 110 与位置 / 速度命令发生器 110' 基本上相同,只是滤波器 111',112',113' 和 114' 不同于滤波器 111,112,113 和 114。

[0159] 从本公开中受益的本专业的普通技术人员会意识到,不同于上述的位置 / 速度命

令可以加到图 9 的位置 / 速度控制系统。一般说来,任何适当的位置 / 速度命令信号都可以展开为富里叶级数,以描述任何周期性波形,在其极限情况下,可以描述为方波。例如,输入 X 和 Y 位置和速度命令可以作为按照以下关系产生的时间函数 : $X_{cmd}(t) = r*\cos(\omega*t)$  ;  $X_{dot\_cmd}(t) = -r*\omega*\sin(\omega*t)$  ;  $Y_{cmd}(t) = r*ecc*\sin(\omega*t)$  ; 和  $Y_{dot\_cmd}(t) = r*ecc*\omega*\sin(\omega*t)$  ; 式中  $r$  是长轴,  $ecc$  是所需的偏心率,  $\omega$  对应于所需的工作频率,而  $t$  是时间。

[0160] 另外,可以使上述所需椭圆轨道与用  $((X/A)^n + (Y/B)^n = r$  限定的“超椭圆”匹配,式中  $n$  为  $>= 2$  的整数。可以以命令基准信号的富里叶级的角速度  $\omega$  沿这样的超椭圆轨道来回移动。然后位置 / 速度控制系统试图跟踪位置 / 速度波形直至驱动能力的极限和带宽。

[0161] 图 12A-12D 举例说明上面联系图 9 描述的类型的位置 / 速度控制器的操作。每一个图举例说明沿着 X 轴在无负载的情况下作线性运动的执行器 40 可动件的 X 和 Y 运动、FX 和 FY 命令、磁通量命令和磁通量值,而图 12B 举例说明在满负载的情况下同一运动类型的操作。类似地,图 12C 和 12D 分别举例说明无负载和满负载情况下作圆形运动的系统的操作。

[0162] 正如图 12A-12D 清楚表明的,不论在无负载还是在满负载情况下,由正如这里描述而构造的磁通量控制器在执行器 40 中建立的磁通量都是间断的,并将紧密地跟踪磁通量命令。

[0163] 上述位置 / 速度控制系统全都基于静止的参考系(例如, X 和 Y)。设想一个替代实施例,其中用于控制目的的参考系基于旋转坐标。这样的旋转坐标的采用,对于给定性能目标,可以减少所需采样速率,提供改善的相位和振幅跟踪。此外,这样的旋转坐标的采用可以通过 PI 控制律控制器的使用把稳态误差减到最小和 / 或保证零稳态误差,因为对于这样的参考系,这样的“旋转”控制系统所使用的控制变量是 DC 量。

[0164] 根据本发明的一个实施例,旋转位置 / 速度控制器可以基于 QD 旋转参考系构造,其中定义可动件的运动,不是用 X 和 Y 位置和速度,而是用旋转矢量 Q 和 D,所述旋转矢量 Q 和 D 各自具有相应的矢量,所述矢量的元素在稳态下是 PC 量。这样的 QD 位置 / 速度控制系统起的作用类似于上面联系 XY 控制系统描述的,一般说来,例外只是下述几点。

[0165] 采用旋转位置 / 速度控制器时,可以根据 QD 基准向位置 / 速度控制器既提供位置 / 速度命令,又提供来自位置 / 速度观察器 93 的反馈信号,反映执行器可动件位置 / 速度。或者,可以根据 XY 位置和速度提供位置 / 速度命令和反馈信号,在这种情况下,位置 / 速度命令和信号必须从 XY 参考系转换为 QD 参考系。这种转换可以利用适当编程的数字处理器完成。

[0166] 图 13 一般地举例说明根据本发明某些方面构造的一种形式的 QD 控制系统 130。一般说来,QD 控制系统包括 QD 控制器 132,它在其输入端接收位置命令信号,它在预先限定的 QD 参考系内定义执行器 40 可动件的所需运动。具体地说,在所举例说明的实施例中,输入 QD 位置命令是:(i)  $q_{cmd}$ ,它定义 Q 矢量所需的瞬时幅度和符号;(ii)  $d_{cmd}$ ,它定义 D 矢量所需的瞬时幅度和符号;(iii)  $q_{dot\_cmd}$ ,它定义 Q 矢量的幅度所需的改变速率;(iv)  $d_{dot\_ref}$ ,它定义 D 矢量的幅度所需的改变速率;和(v)  $fc$ ,它定义系统所需的工作频率。一般说来,Q 和 D 是准静态变量,其值可以  $> 0$  或  $< 0$ 。

[0167] 图 13 的示范性控制器 130 适用于轨道焊接装置, 并且本身特别适合于控制执行器 40 可动件的椭圆运动。因此, 在旋转椭圆 QD 参考系中进行所述 QD 控制操作。为了定义适当的旋转椭圆 QD 参考系, QD 控制器 130 需要两个附加变量。类似于上面讨论的 ecc\_command, 第一变量 (ecc\_command) 定义沿着 X 轴的椭圆长轴与沿着 Y 轴的短轴的比率。第二变量 (delta) 定义旋转椭圆参考系的长轴偏离静止的 X 轴的角度范围。

[0168] QD 控制器 132 的其他输入包括提供有关执行器 40 可动件位置 / 速度的信息的反馈信号。一般说来, 这些信号是由位置 / 速度观测器 93 提供的, 类似于上面讨论的位置 / 速度观测器 93, 包括 X 和 Y 加速度计。来自位置 / 速度观测器 93 的 X 和 Y 位置 / 速度信息转换为对应于适当的旋转椭圆 QD 参考系中可动件的 QD 参数的 q, d, q\_dot 信号。这种转换是由 XY 到 QD 转换操作完成的。来自功能块 131 的 QD 位置 / 速度信息作为另一组输入提供给 QD 控制器 132。然后 QD 控制器把有关可动件的 QD 信息与命令 QD 信息比较, 以产生用以产生所需 Q 和 D 力命令 FQ 和 FD 的 QD 误差信号。然后把这些力命令通过由功能块 133 反映的 QD 到 XY 转换操作转换为 FX 和 FY 力命令参考系中的力命令。接着把 FX 和 FY 信号加到力控制系统 50, 后者以前面联系图 5 力控制系统时描述的方式控制加到执行器 40 的力。

[0169] 图 13 的 QD 控制器以及功能块 131 和 133 可以利用编程数字处理器加以实现。图 14A-14D 一般地举例说明可以用来实现示范性 QD 控制器 132 以及功能块 131 和 133 的功能块。图解说明的控制器连续工作, 尽管从本公开受益的本专业的普通技术人员会意识到, 采样 QD 控制器也可以由这里传授的技术构造。

[0170] 参考图 14A, 其中提供 QD 控制器 132 以及功能块 131 和 133 的概貌。在举例说明的实施例中, 图解说明的 QD 控制器从包括加速度计的位置 / 速度观测器 93 接收 X 和 Y 加速度信息。由功能块 100X 和 100Y, 101X 和 101Y 处理 X 和 Y 加速度信息, 以前面联系图 10A 描述的方式产生 X\_est, X\_dot\_est, Y\_est 和 Y\_dot\_est 信号。然后把 XY 估计位置和速度信息提供给转换功能块 140 作为输入, 后者把来自功能块 101X 和 101Y 的 XY 信息转换为适当的旋转椭圆 QD 参考系。图 14C 对功能块 140 的操作提供更详细的说明。

[0171] 提供一个替代实施例, 其中, 直接测量 X, X\_dot, Y 和 Y\_dot, 采用上述方法估计 X, X\_dot, Y 和 Y\_dot, 即, 或者从 X、Y 或者从 X\_dot 和 Y\_dot 估计 X, X\_dot, Y 和 Y\_dot。再进一步, 可以直接把 aX, aY 转换为 aQ, aD, 而用于 Q, D\_dot, D, D\_dot 的观测器可以用于所述旋转参考系。

[0172] 参考图 14C, 功能块 140 包括子功能块 141, 142 和 143。这些功能块把来自位置 / 速度观测器 93 的 X Y 信息转换为所需的旋转椭圆参考系中的 QD 信息。起始时, 把 X\_est, X\_dot\_est, Y\_est 和 Y\_dot\_est 提供给功能块 141, 后者把 XY 信号转换为 XY 参考系, 所述参考系是由标准的固定参考系旋转一个对应于上述 delta 变量的值而获得的。因此, 功能块 141 的输入构成 XY 参考系中的 XY 位置和速度数据, 所述 XY 参考系从标准 XY 参考系偏移一个由输入变量 delta 限定的角度量。

[0173] 来自功能块 141 的经过 delta 调整后的 XY 信息加到功能块 142 上作为输入, 后者接收 delta 调整后的 XY 信号, 并将这些信号转换为经过调整以适应所需的椭圆参考系的偏心率的 XY 参考系中的 XY 信号。一般说来, 功能块 142 针对所述椭圆长轴 X 和短轴 Y 之间的差值调整进行了 delta 调整的 XY 信号。正如图 14C 所反映的, 功能块 142 的一个输入信号是 ecc\_command。

[0174] 来自功能块 142 的经过 delta 和 ecc 调整的 XY 信号 ( $X_c, X_{dot\_c}, Y_c$  和  $Y_{dot\_c}$ ) 作为输入加到功能块 143 上。一般说来, 功能块 143 将其输入信号 (用标准 XY 参考系表示) 转换为用旋转圆形参考系表示的 QD 信号。因为 XY- 圆 QD 功能块 143 的输入信号是经过 delta 和 ecc 调整的 XY 信号, 所以, 无论如何来自功能块 143 的  $q_{est}, d_{est}, q_{dot\_est}$  和  $d_{dot\_est}$  信号将等效于旋转椭圆 QD 参考系中的信号。正如图 143C 所反映的, fc 信号用在功能块 143 中作为 “theta” 变量。所述 theta 变量定义为  $2\pi * fc * t$ , 其中  $t$  为时间。

[0175] 相信在图 14C 中完成转换的特定顺序是图解说明的控制器的某些实现中是特别重要的, 因为它保证进行适当的调整, 以便准确地把输入的 XY 命令转换为对应于适当的旋转椭圆参考系的命令。

[0176] 参考图 14A, 来自功能块 143 的  $q_{est}, d_{est}, q_{dot\_est}$  和  $d_{dot\_est}$  信号加到总称为 144 的一组功能块上。功能块 144 把反映执行器 40 可动件位置 / 速度的估计的 QD 信号与命令 QD 信号比较, 产生 QD 误差信号。功能块 144 还可以实现任何适当的控制律, 诸如多输入 / 多输出 PI 控制律。来自功能块 144 的所述 QD 误差信号借助于矩阵求和功能块 145 适当求和, 产生力命令信号 FQ 和 FD。图 14B 提供求和矩阵 145 的示范性变量。

[0177] 在图 14A 的实施例中, 力命令信号 FQ 和 FD 通过低通滤波器 146a 和 146b 进行低通滤波。然后通过功能块 147 把滤波后的 FQ 和 FD 信号转换为相应的 FX 和 FY 命令。图 14D 提供可以用来实现功能块 147 的子功能块的一般说明。

[0178] 参考图 14D, 滤波后的 FQ 和 FD 信号首先转换为相应的 XY 力命令信号 FX\_circ 和 FY\_circ。在举例说明的实施例中, 由功能块 148 完成的转换是简单的圆 QD-XY 转换, 它并不考虑所述控制器所用的 QD 参考系的椭圆性质或所述参考系对标准 XY 参考系的 delta 偏移。

[0179] 然后把来自功能块 148 的 FX\_circ 和 FY\_circ 命令作为输入加到功能块 149。功能块 149 还接收 ecc 命令作为输入。一般说来, 功能块 149 把 FX\_circ 和 FY\_circ 命令转换为经过调整以便考虑所图解说明的 QD 控制器所用的旋转椭圆参考系的椭圆性质的 FX 和 FY 命令 (FX\_elip, FY\_elip)。但是, 来自功能块 149 的 FX 和 FY 命令并未进行调整来反映 QD 控制器所用的旋转椭圆参考系对于标准 XY 参考系的 delta 偏移。这种调整由功能块 150 完成, 后者接收来自功能块 149 的信号和对应于 delta 变量的信号, 并响应这些输入产生 FX 和 FY 命令信号。就像图 14C 中所反映的转换一样, 图 14D 的转换应该按上述特定的顺序完成, 以保证对所述信号进行适当的转换。

[0180] 参考图 14A, 来自功能块 150 的这些 FX 和 FY 信号由增益放大器放大, 并加到力控制器上, 以控制加到上述执行器 40 可动件上的力。

[0181] 虽然为了以下目的的上述各种转换操作看来复杂 : (i) 把 XY 反馈信号转换到旋转椭圆 QD 参考系 ; (ii) 在旋转椭圆 QD 参考系中实现控制律以产生 QD 力命令 ; 和 (iii) 把旋转椭圆 QD 参考系中的力命令向 XY 力命令的转换, 但是, 它们提供几个优点。具体地说, 由于上述转换, 在功能块 144 中实际用来实现系统的控制律的控制变量是 DC 量。这样, 可以采用多输入, 多输出 PI 或其他零稳态误差控制律。采用这样的控制律可以得出比传统控制方法可以得到的性能更好的系统性能。在上述转换的应用是新的轨道焊接应用中尤为如此。具体地说, 采用上述转换和控制律不需要外径控制回路, 因为由这样的回路完成的控制功能是由功能块 144, 145 和 146 实现的控制律处理的。

[0182] 尽管已经联系上述举例说明的实施例描述了本发明，但是本专业的技术人员会意识到，在不脱离本发明的情况下可以作出许多不同的变化。例如，新型执行器 40 在这里首先是在利用磁通控制系统描述的。可以看出，执行器 40 可以由包括，例如会在执行器 40 的 E 型磁芯中产生正弦磁通量的传统的逆变器等的任何不同的装置激励。尽管新型执行器 40 的这样的用途潜在地不像所述执行器由这里描述的新型磁通量控制器激励的应用那样精致或具有同样性能，但是它仍旧提供许多优点，诸如造成 E 型磁芯和与这些磁芯相关的相线圈的去耦合。鉴于上述类型的改变，显然，上述描述只是举例，而非旨在限制。因此，这里寻求以下权利要求书的保护。

图 2A

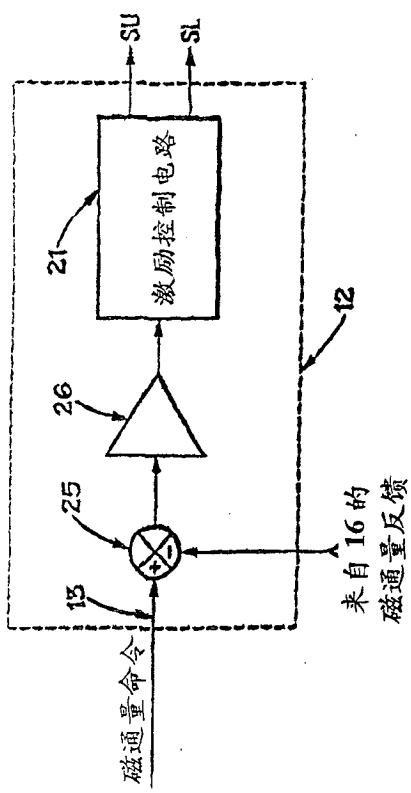


图 2B

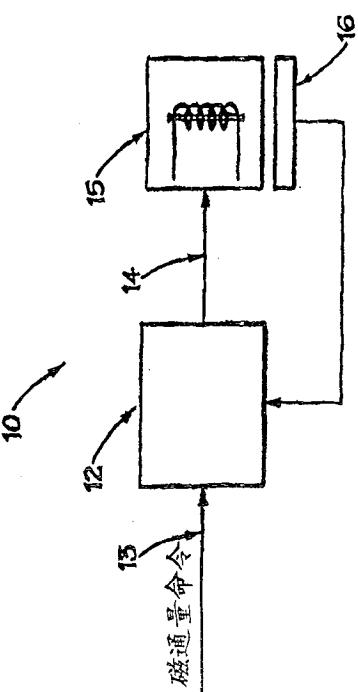
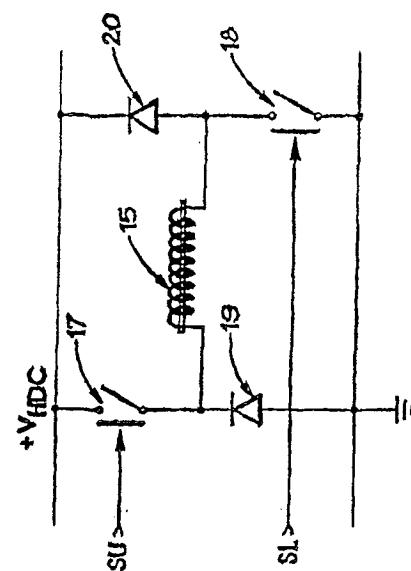


图 1

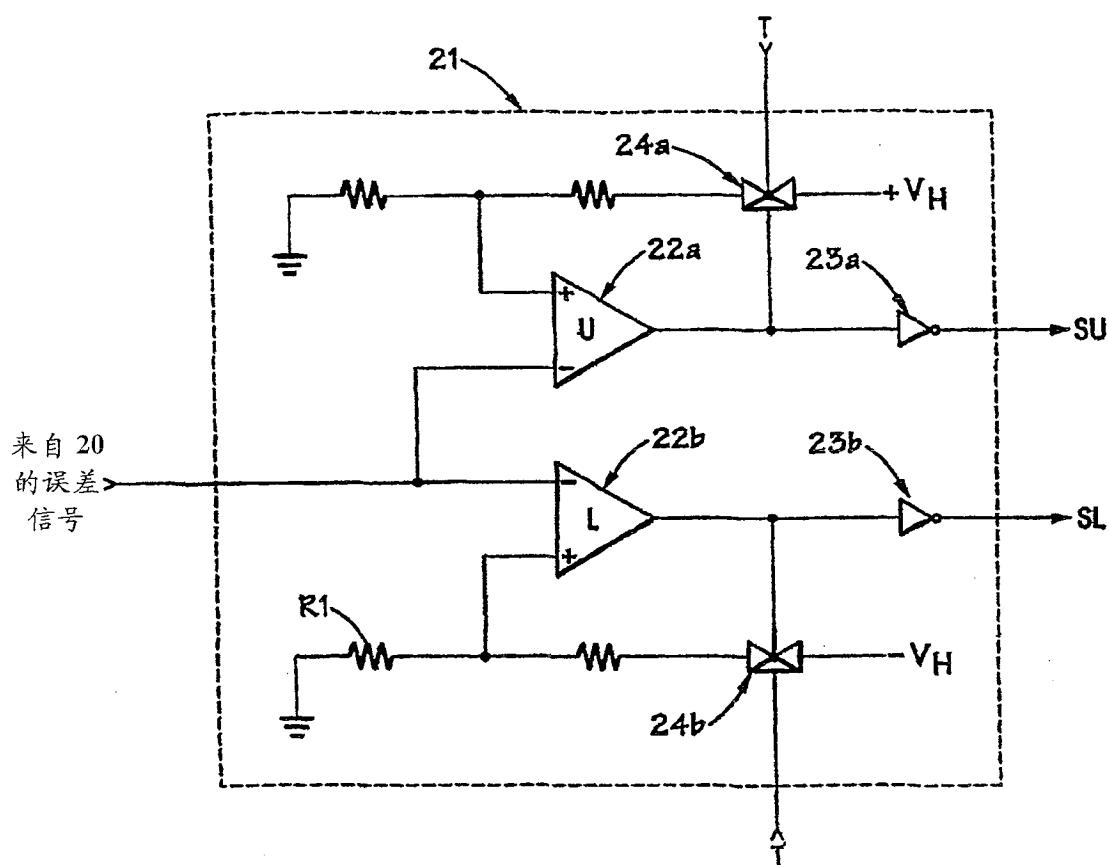


图 2C

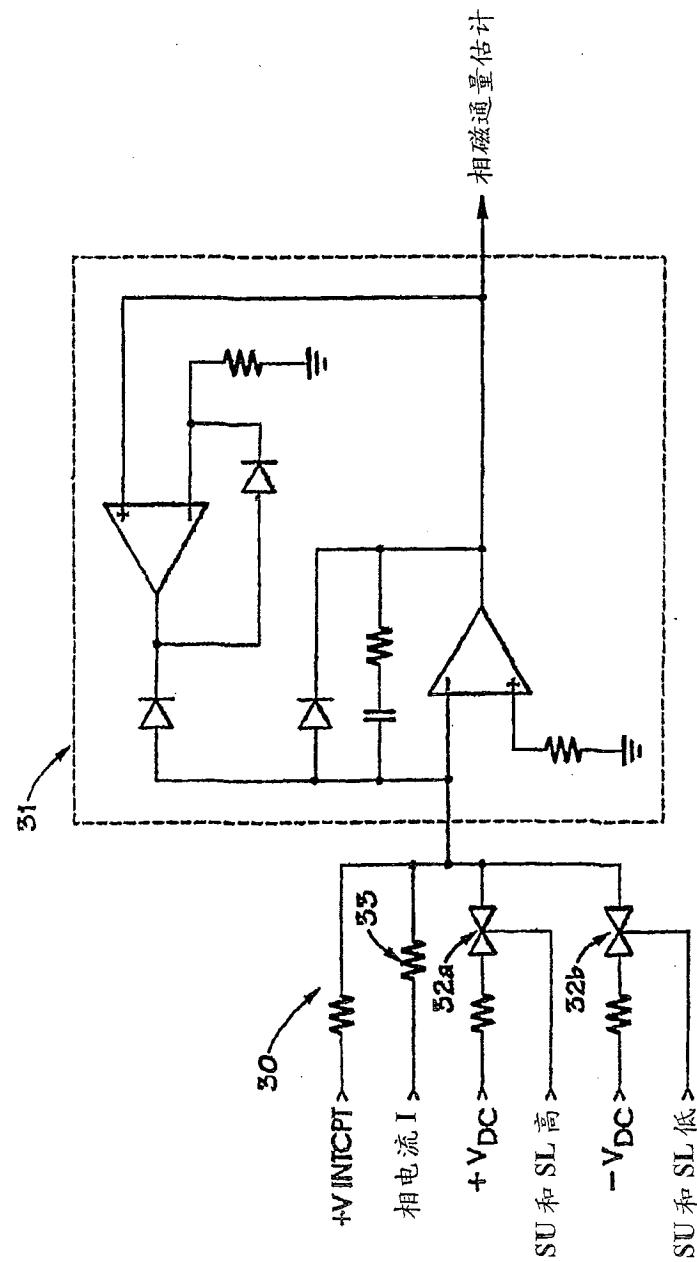


图 3A

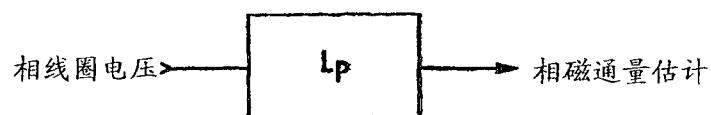


图 3B

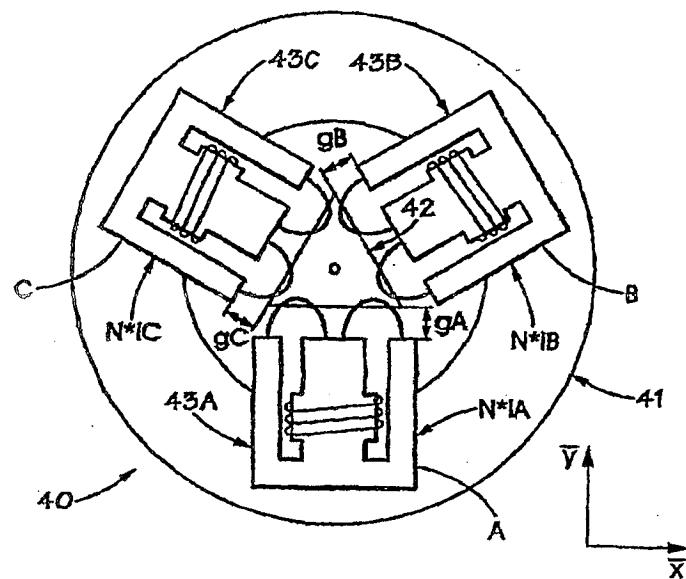


图 4

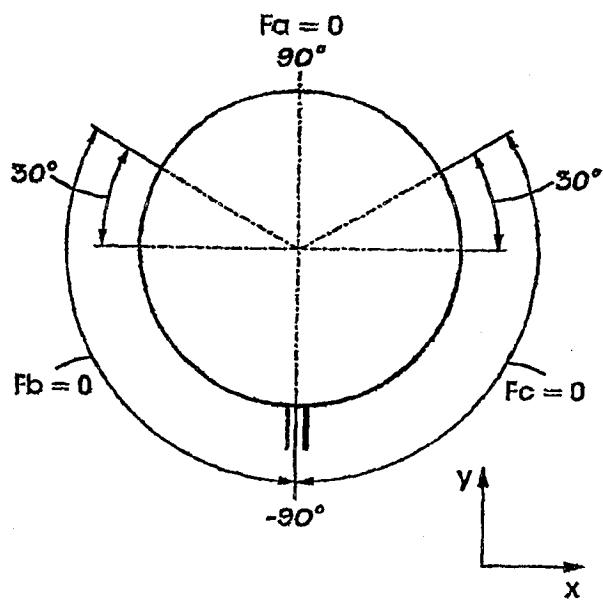


图 7A

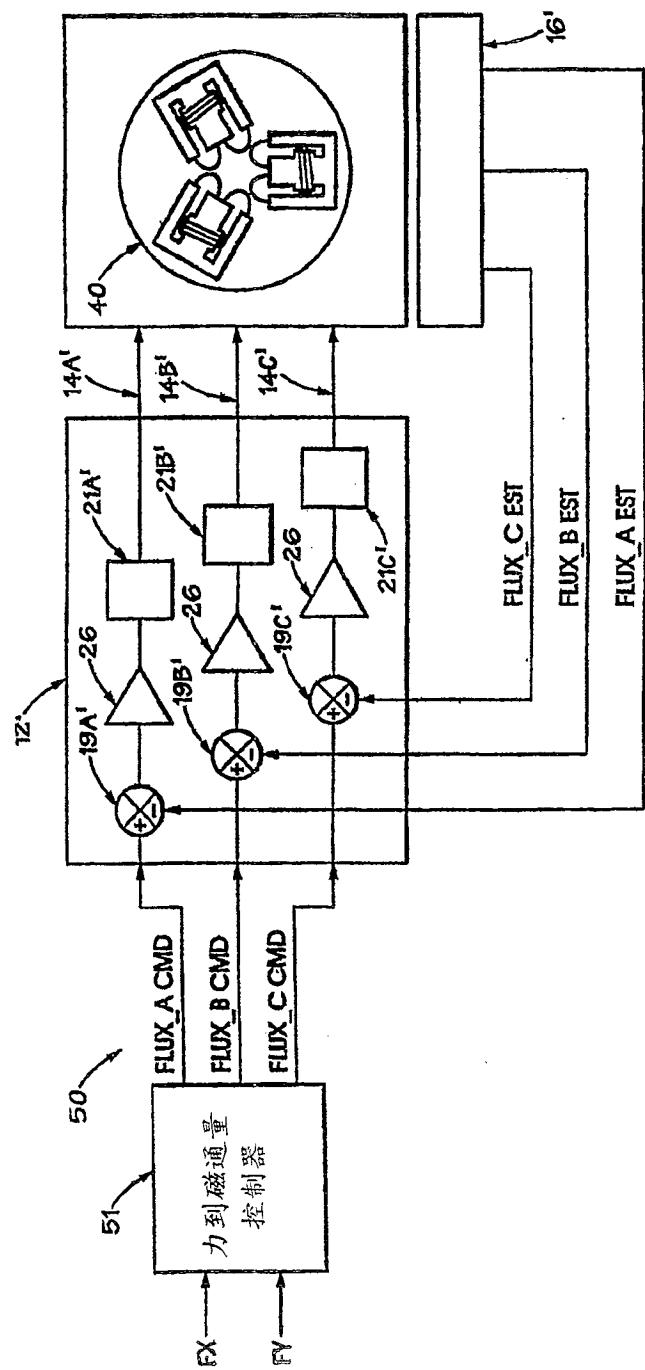


图 5

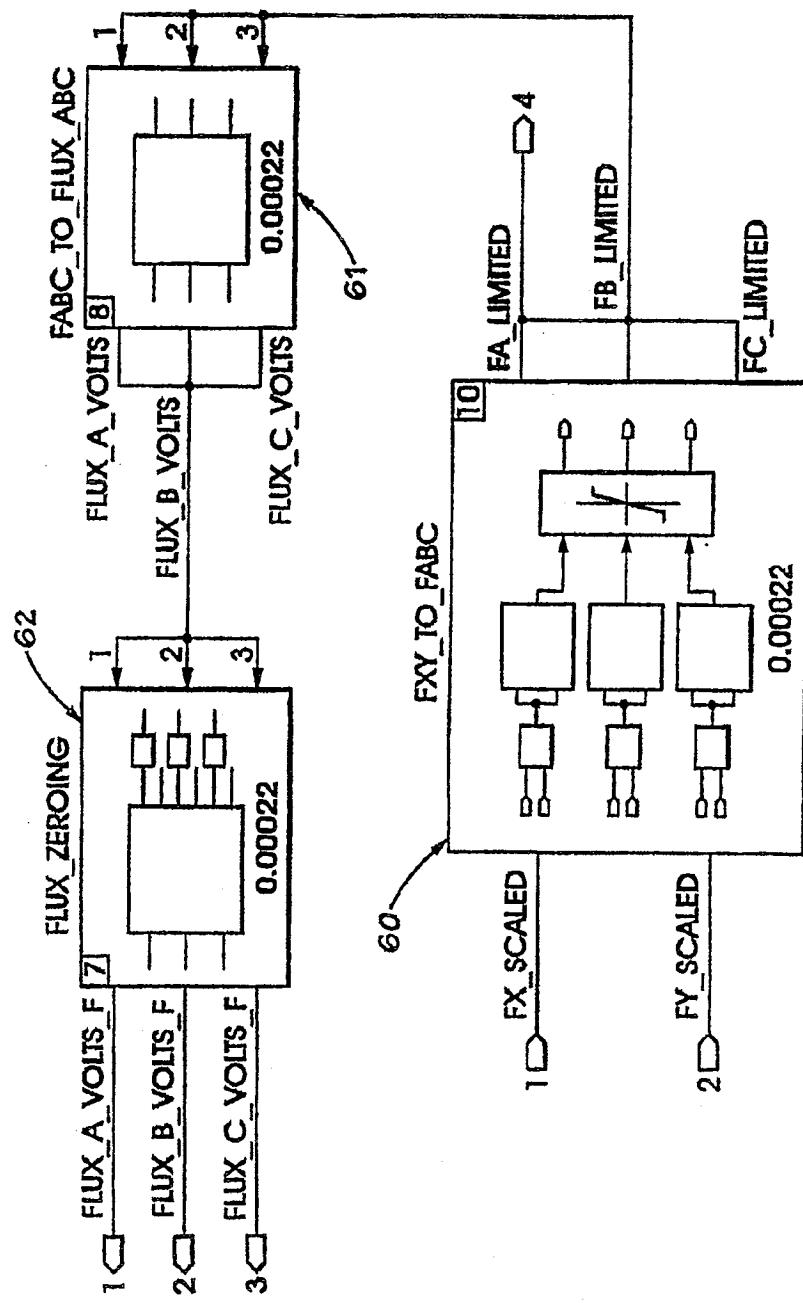


图 6A

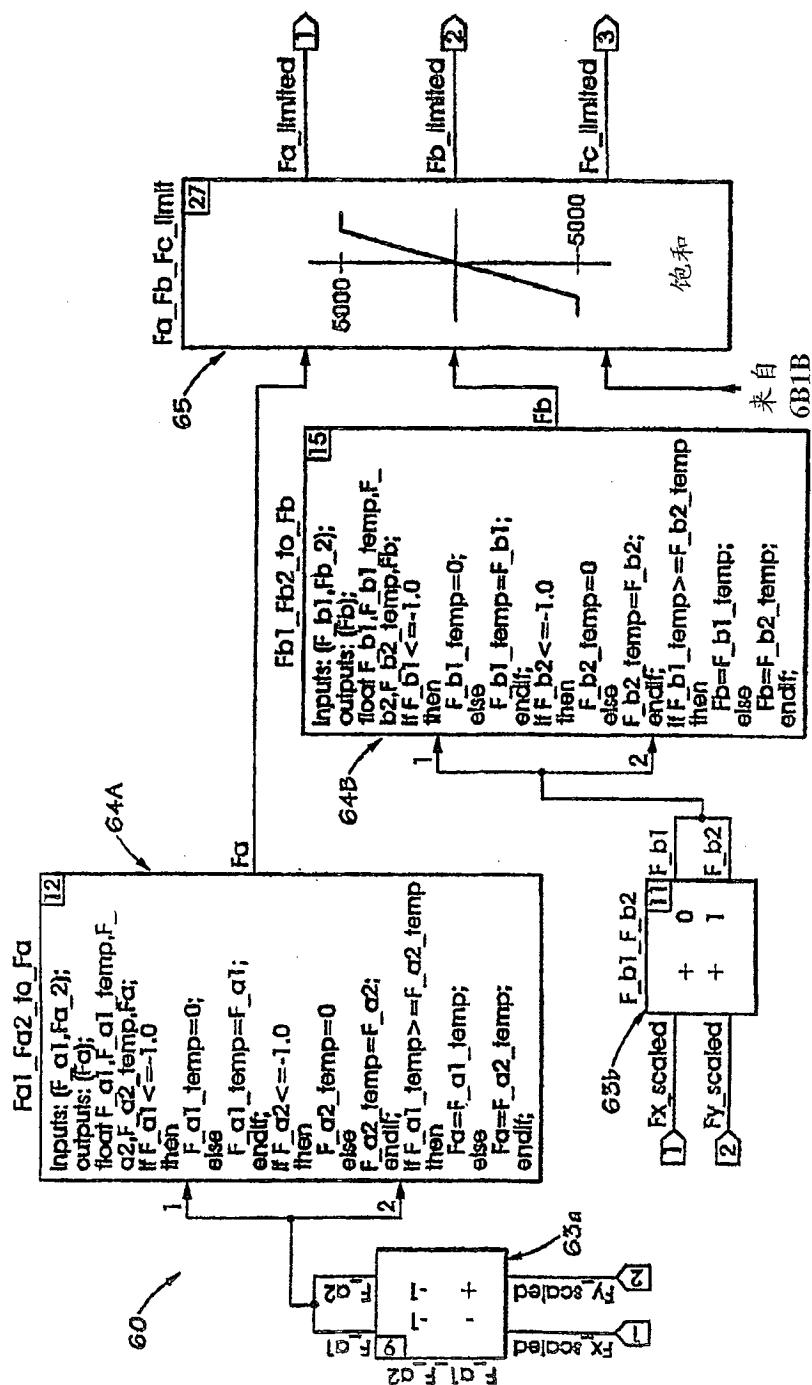


图 6B1A

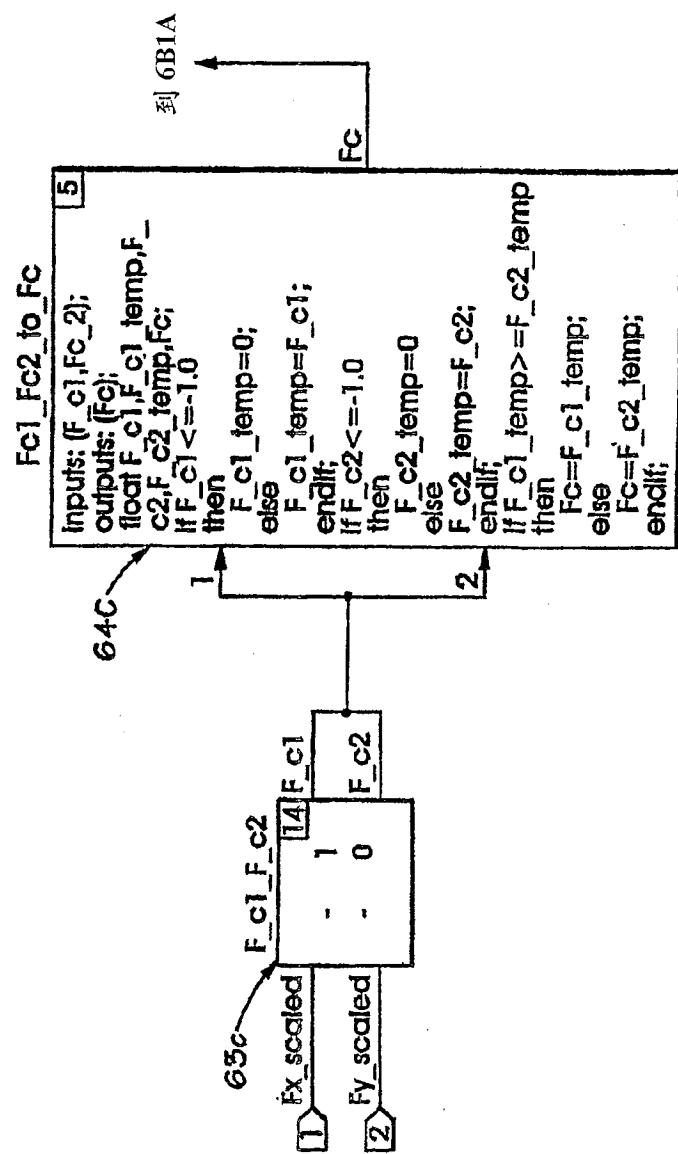


图 6B1B

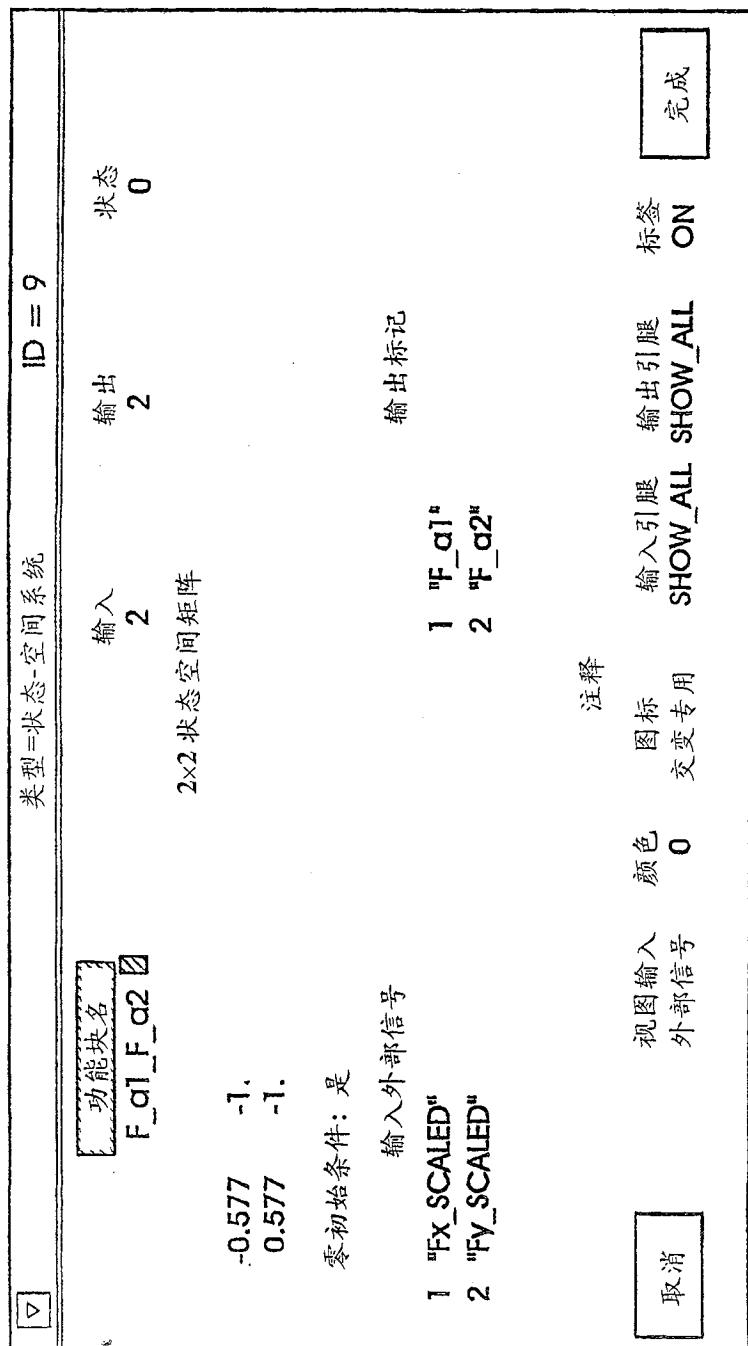


图 6B2

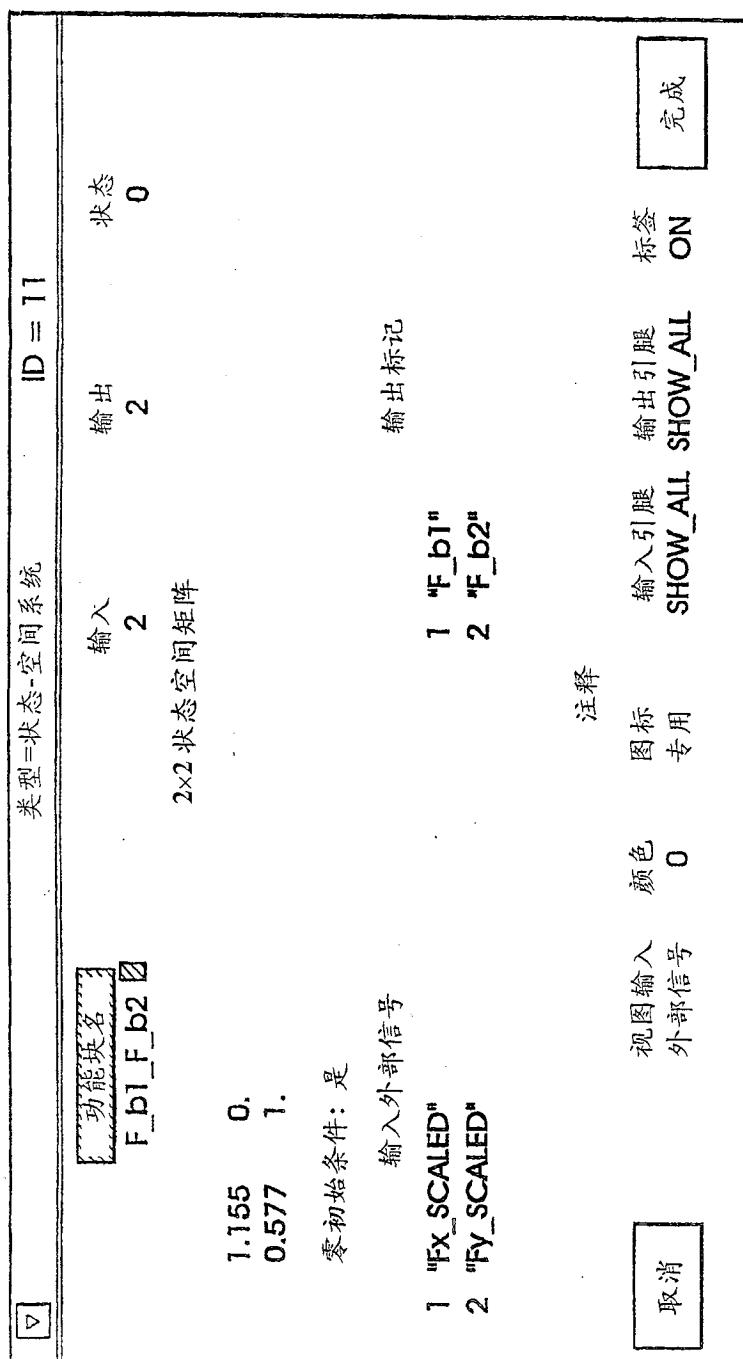


图 6B3

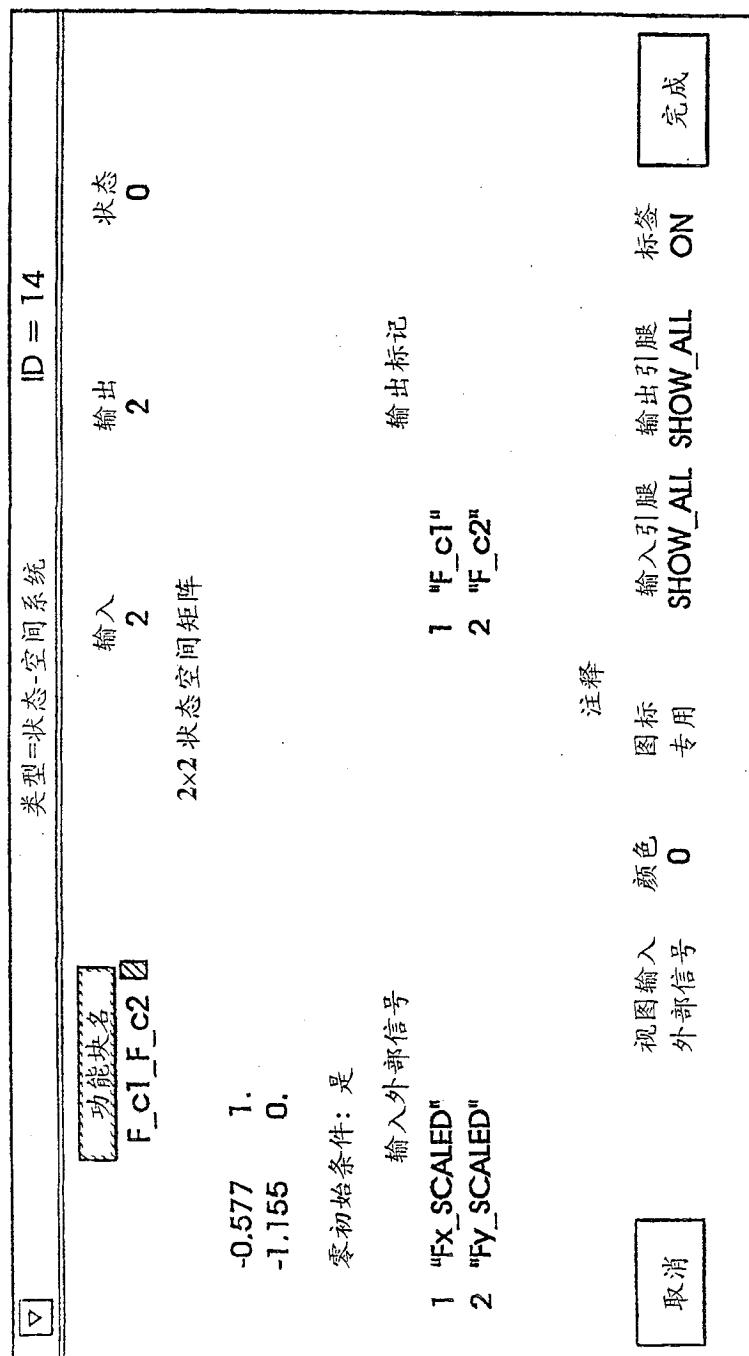


图 6B4

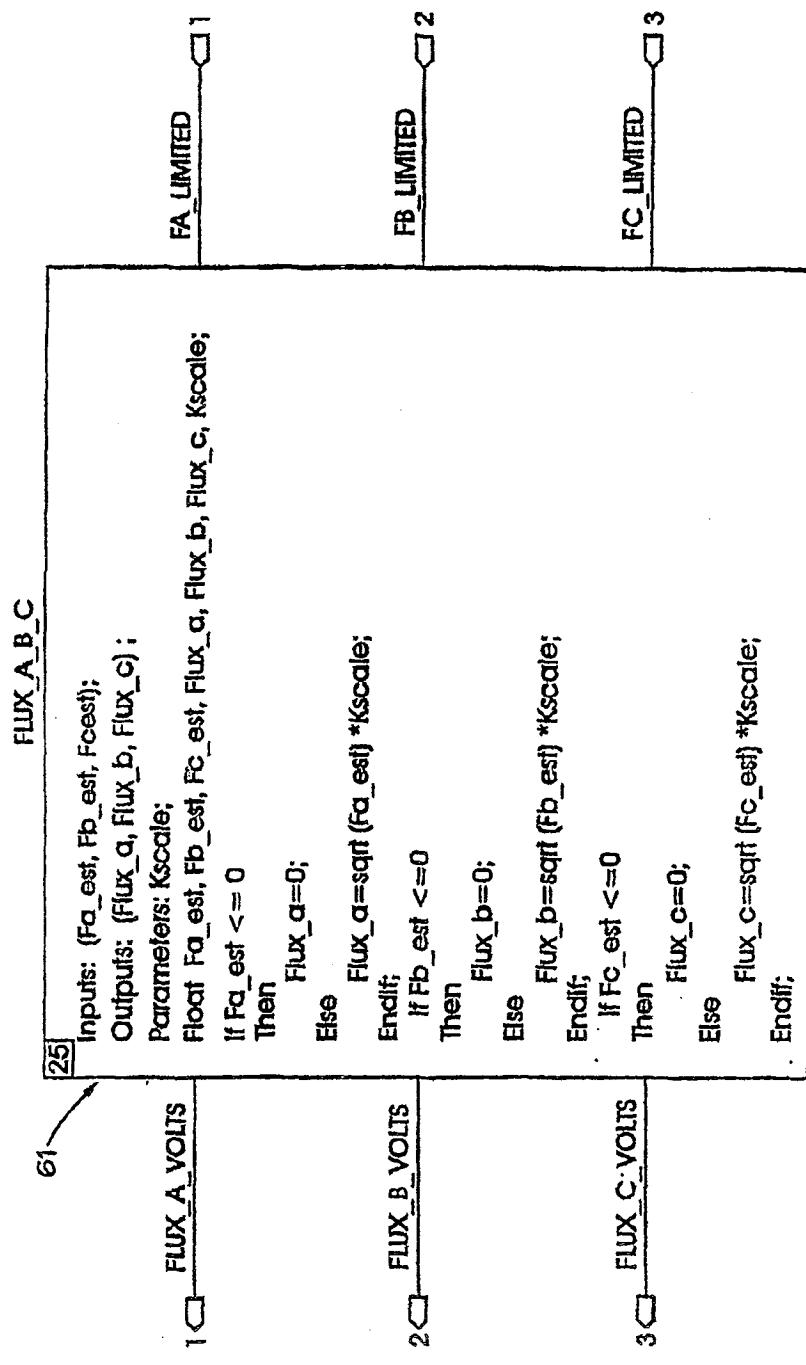


图 6C

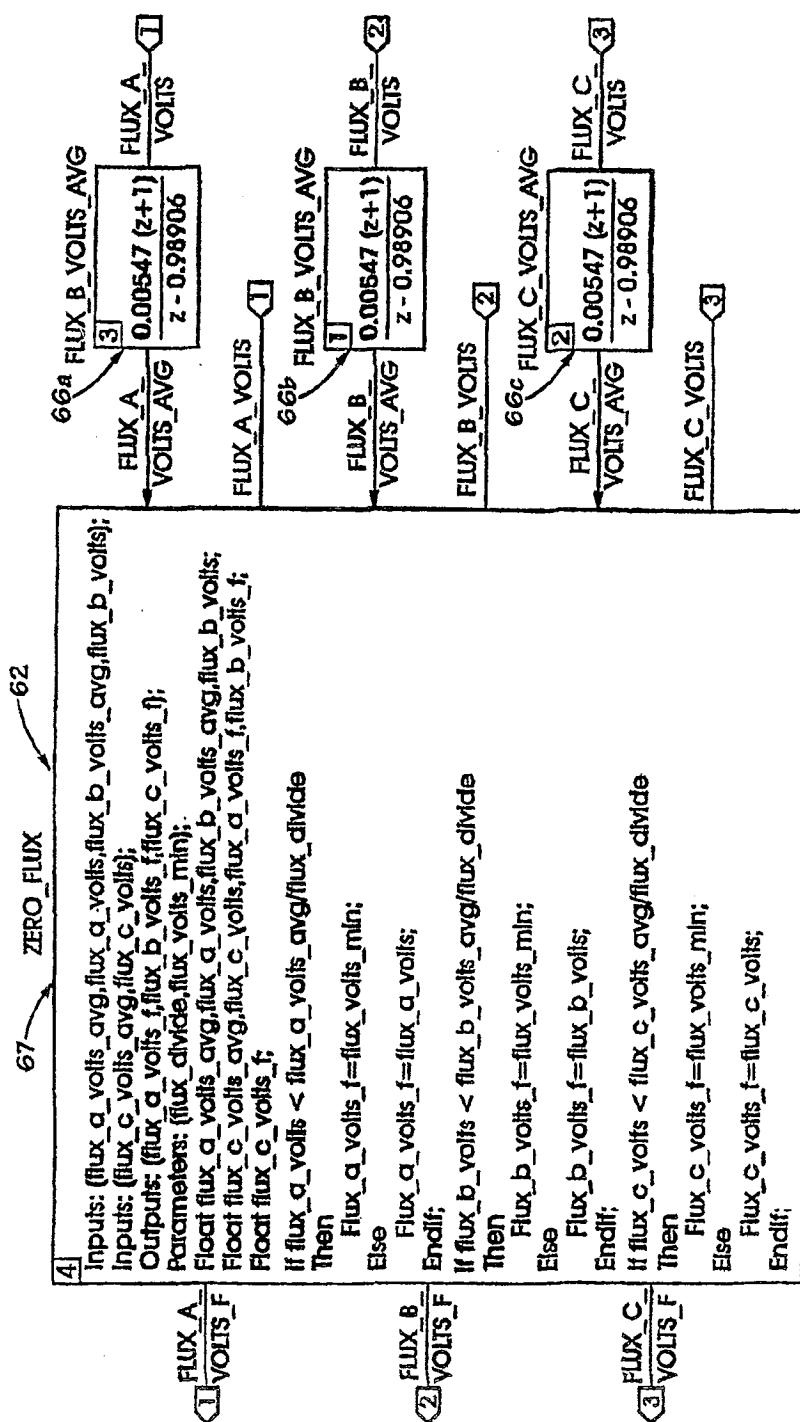


图 6D1

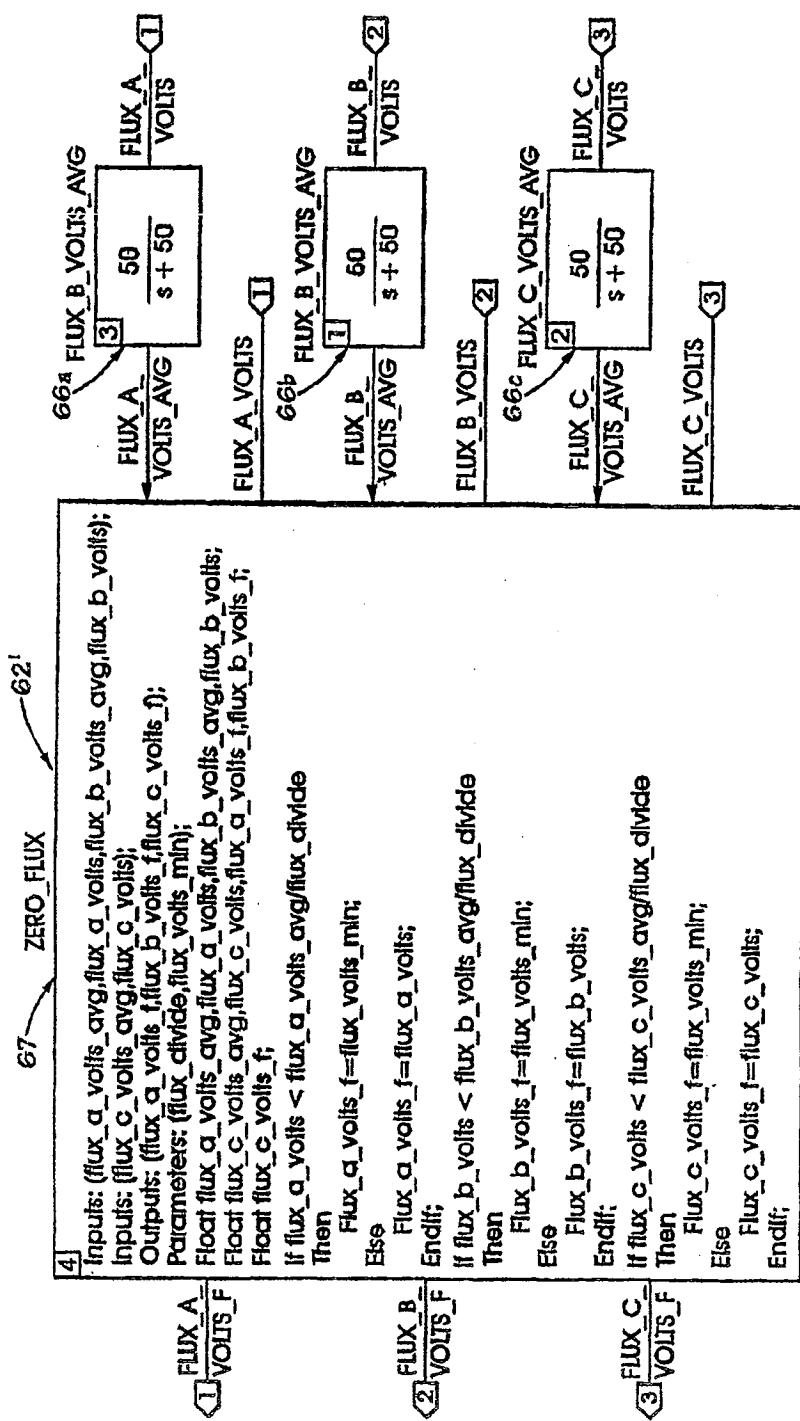


图 6D2

```

Inputs: (Fx, Fy);
Outputs: (Fa, Fb, Fc, angle);
Parameters: pi;
Float Fx, Fy, Fa, Fb, Fc, angle, pi;
If Fx == 0
Then
    If Fy == 0
    Then
        Angle = 0;
    Else
        Angle = atan 2 (Fy, Fx) *180/pi;
    Endif;
Else
    Angle = atan 2 (Fy, Fx) *180/pi;
Endif;
If angle > = -90
Then
    If angle > 30
    Then
        Fc = 0;
        Fb = (2/(sqrt(3.0)))*Fx;
        Fa = Fy+Fb/2;
    Endif;
Endif;
If angle > = 30
Then
    If angle > 150
    Then
        Fb = 0;
        Fc = (1/sqrt(3.0))*Fx+Fy;
        Fa = 2*Fy-Fb;
    Endif;
Endif;
If angle > = 150
Then
    Fb = 0;
    Fc = (-2/(sqrt(3.0)))*Fx;
    Fa = Fy+Fc/2;
Endif;
If angle < -90
Then
    Fb = 0;
    Fc = (-2/(sqrt(3.0)))*Fx;
    Fa = Fy+Fc/2;
Endif;

```

图] 7B

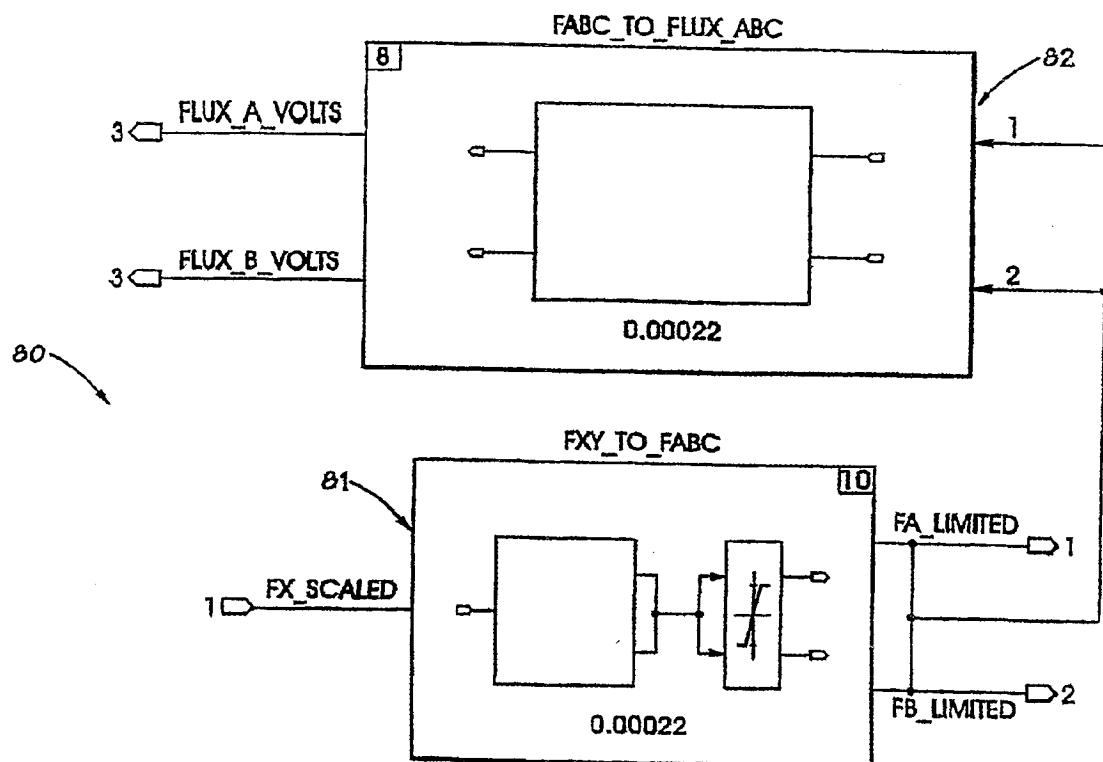


图 8A

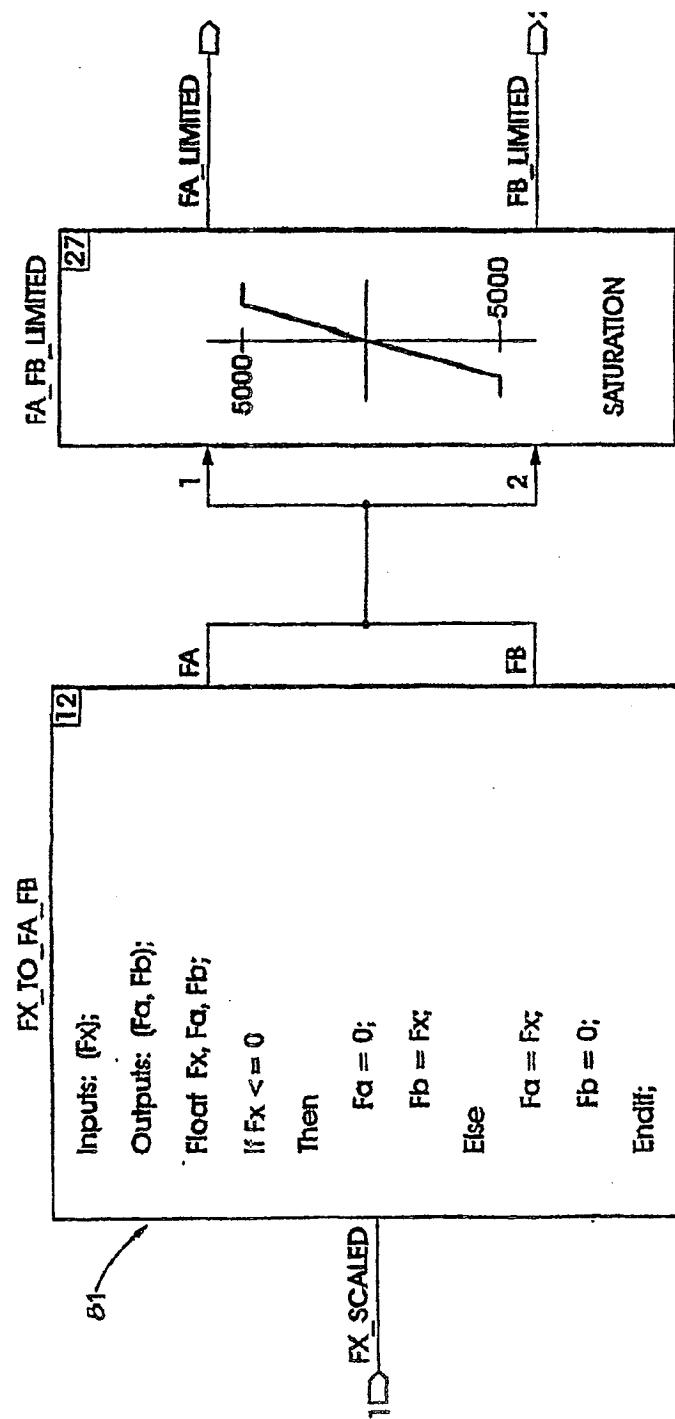


图 8B

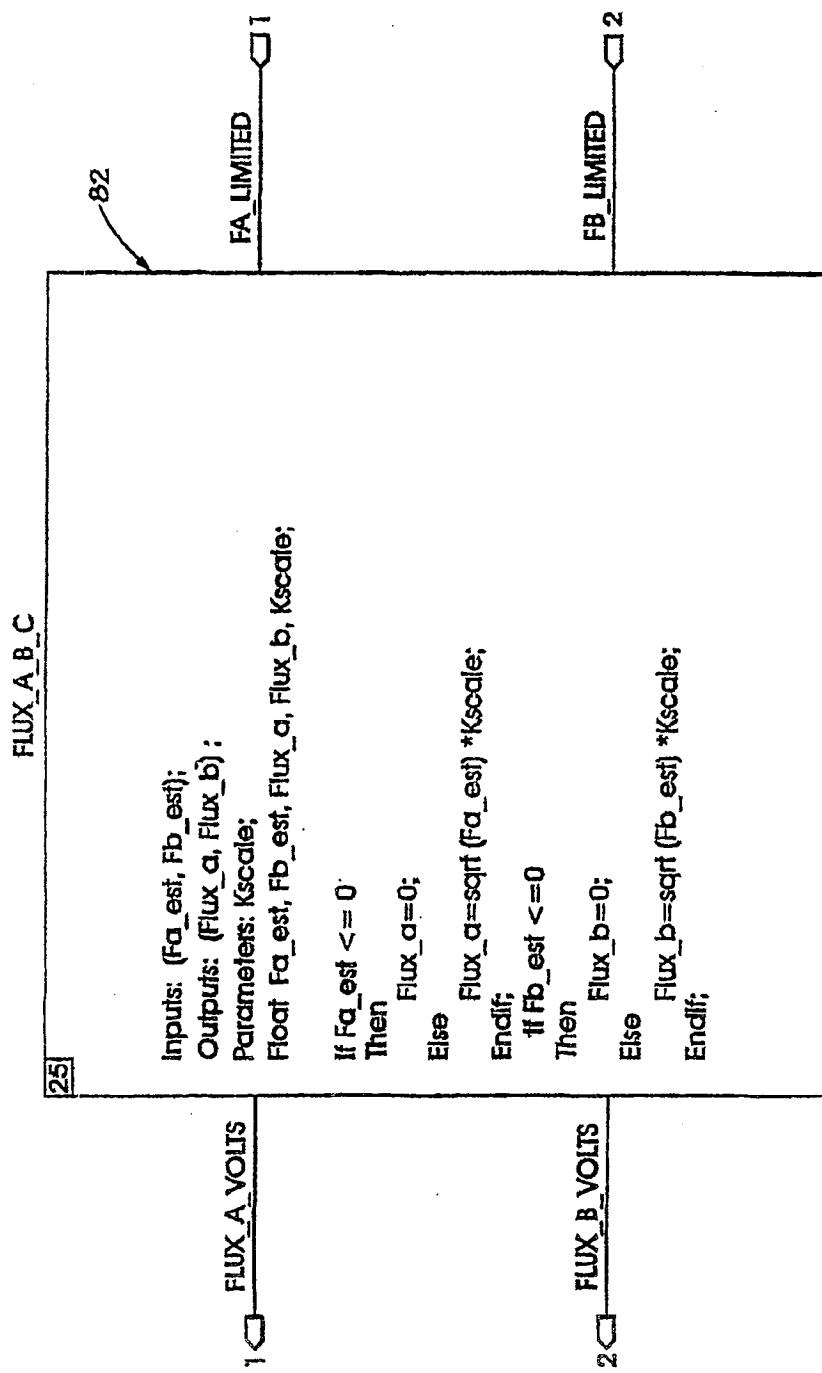


图 8C

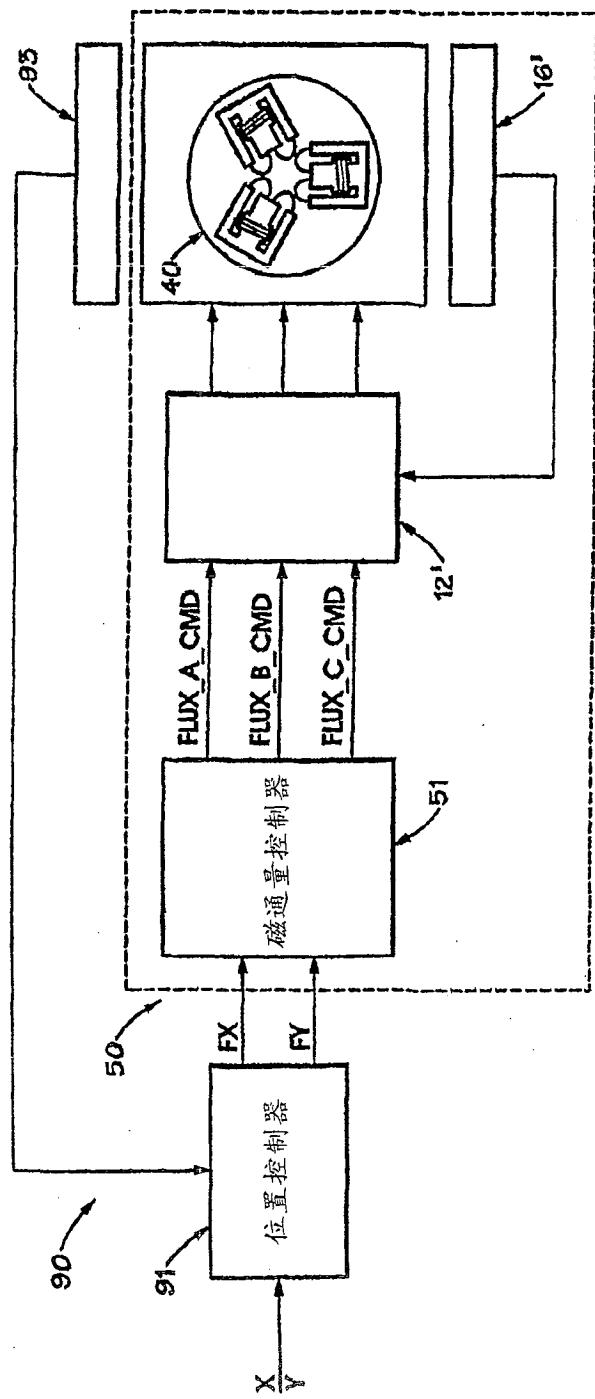


图 9

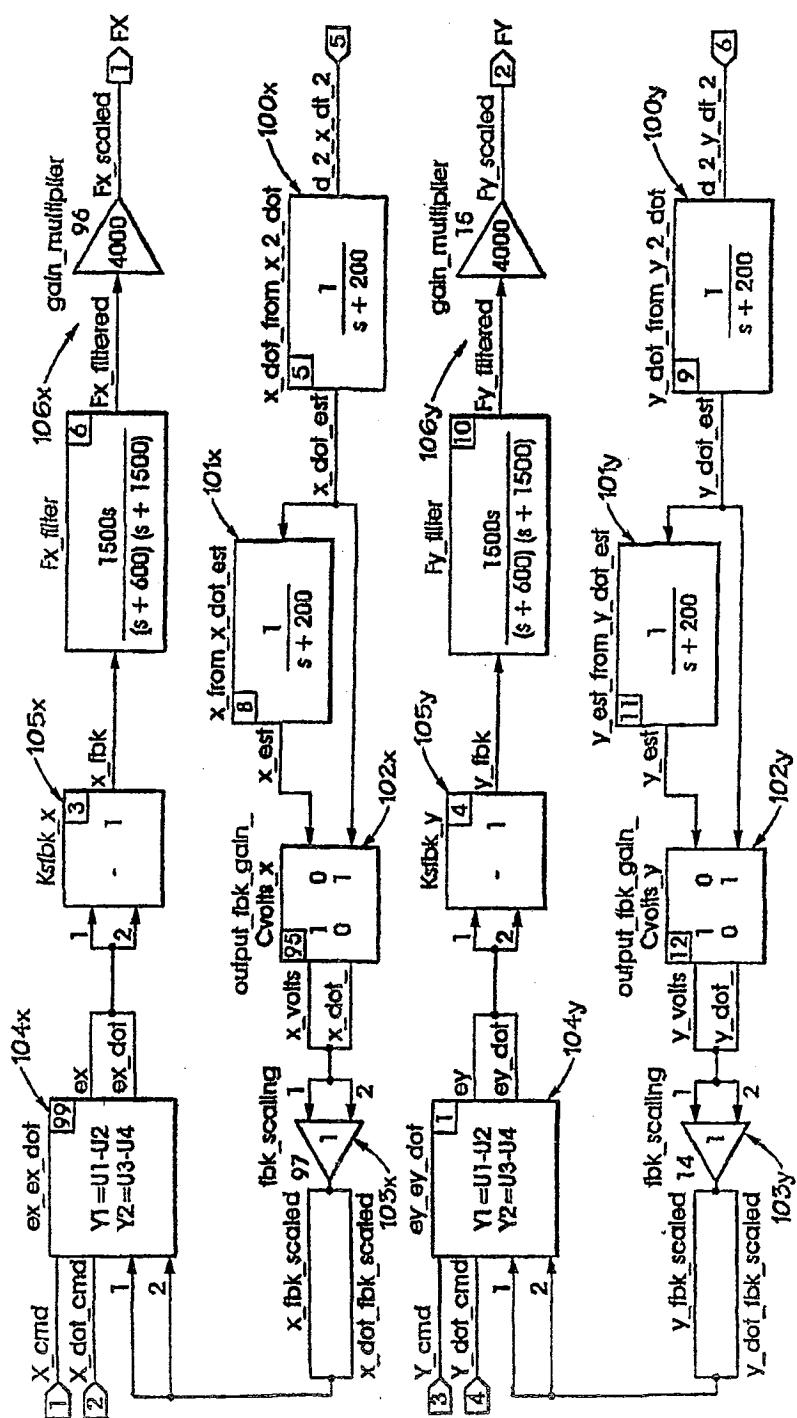


图 10A

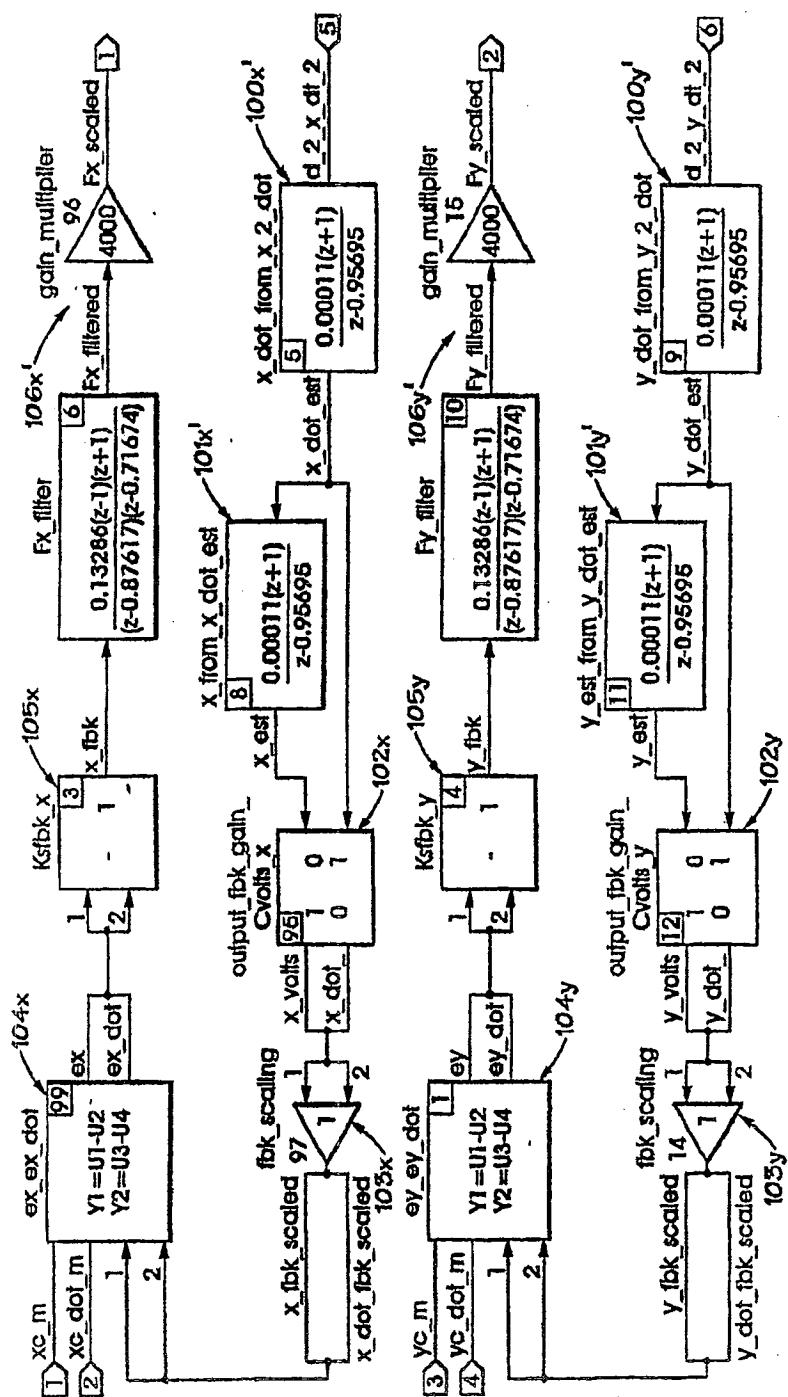


图 10B

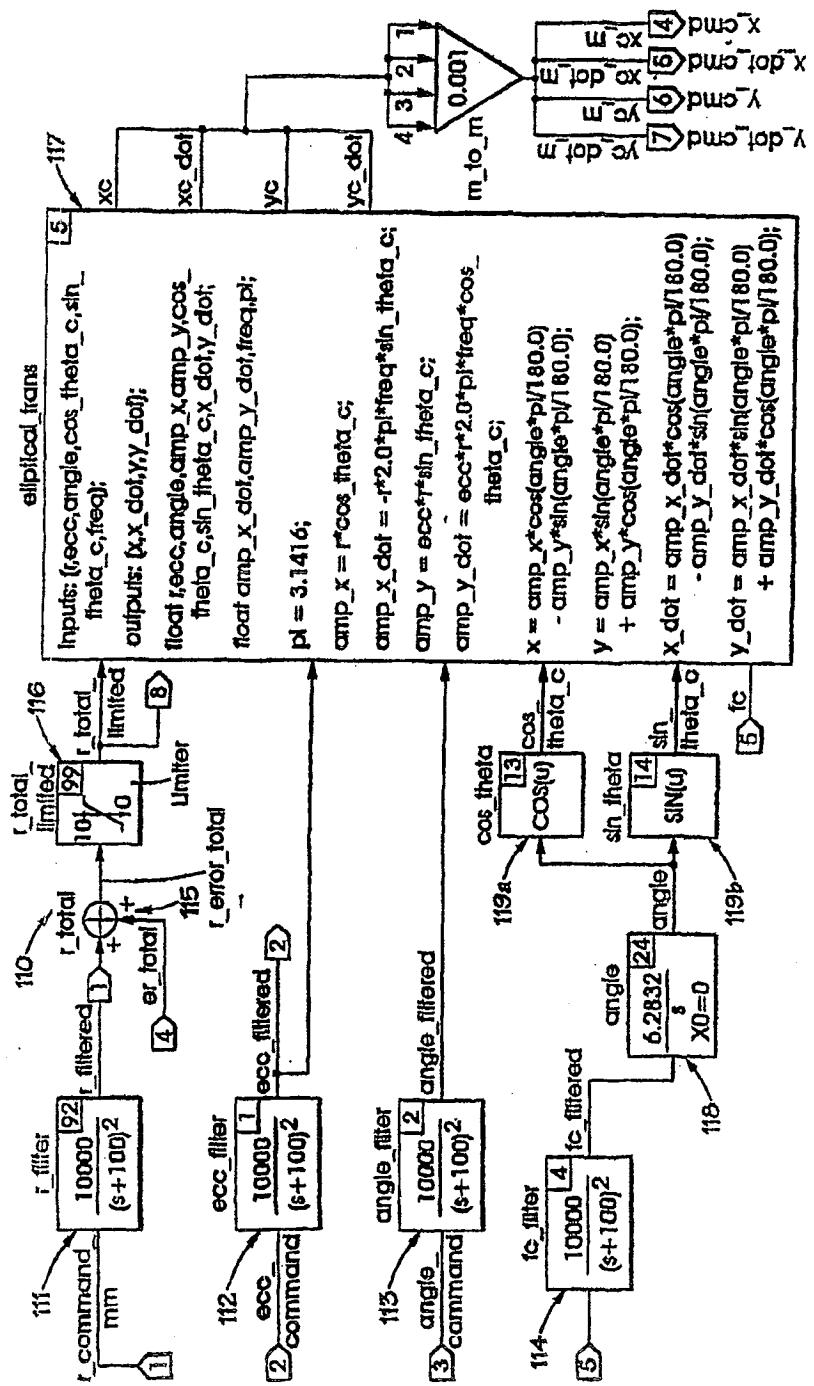


图 11A

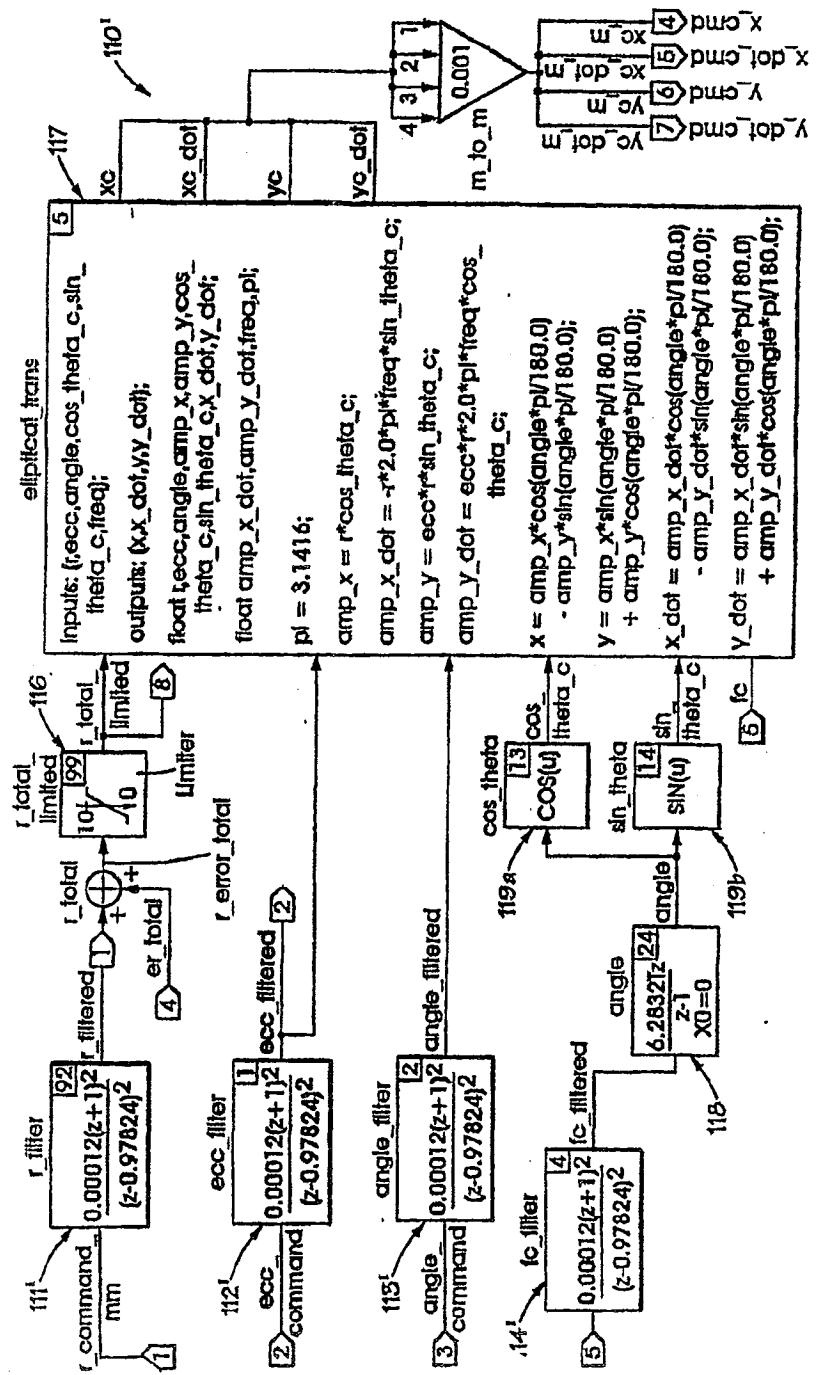


图 11B

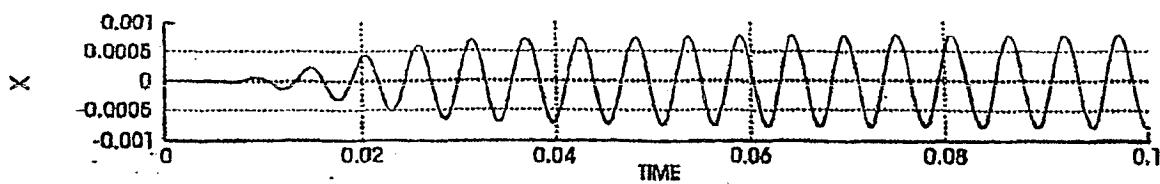


图 12A1

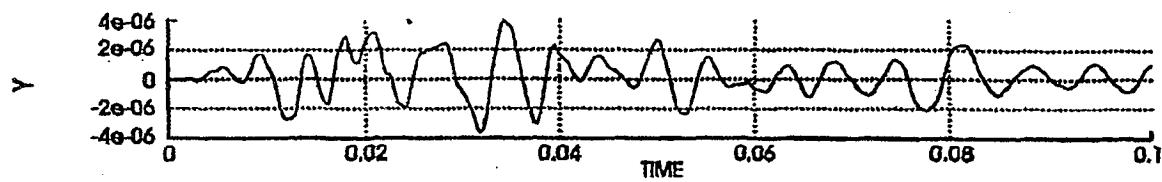


图 12A2

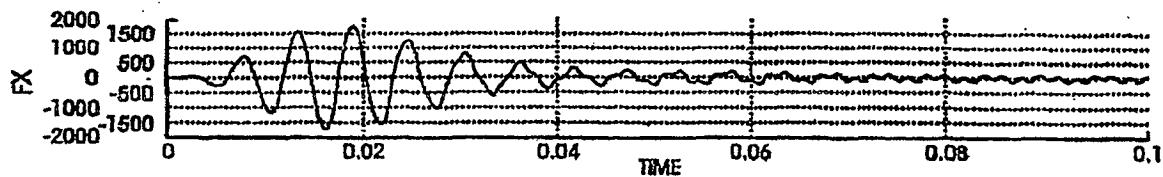


图 12A3

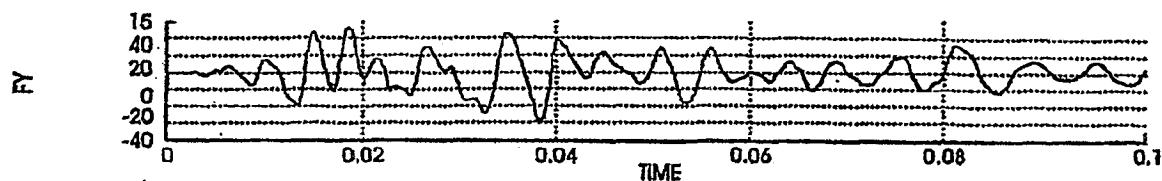


图 12A4

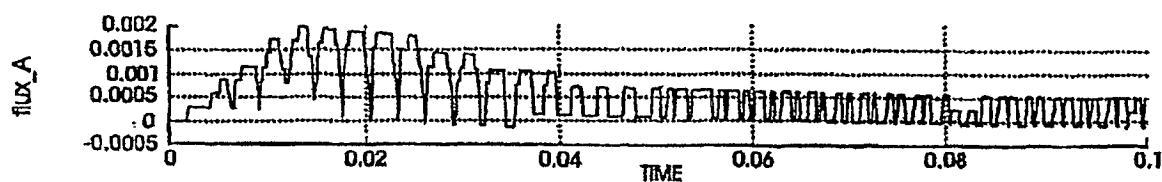


图 12A5

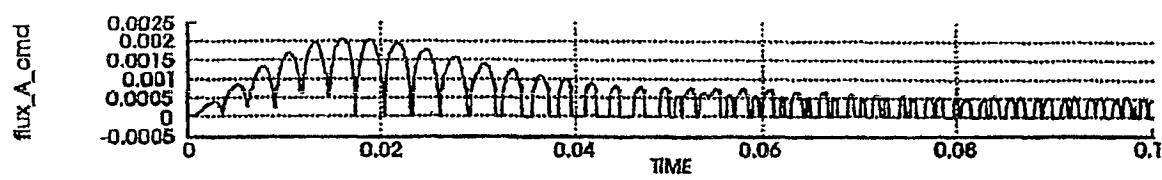


图 12A6

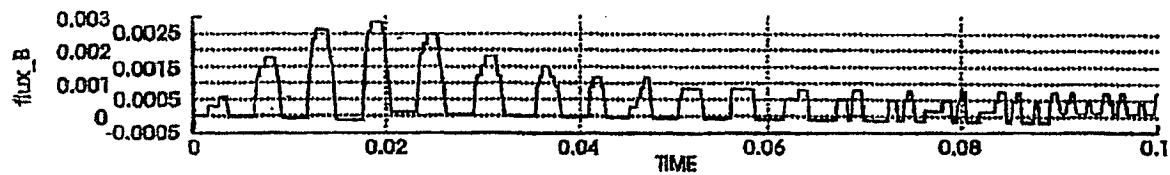


图 12A7



图 12A8

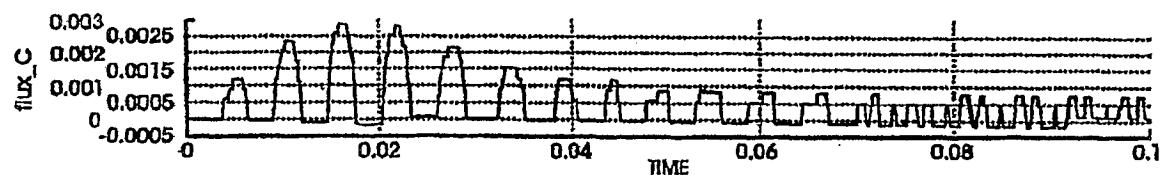


图 12A9

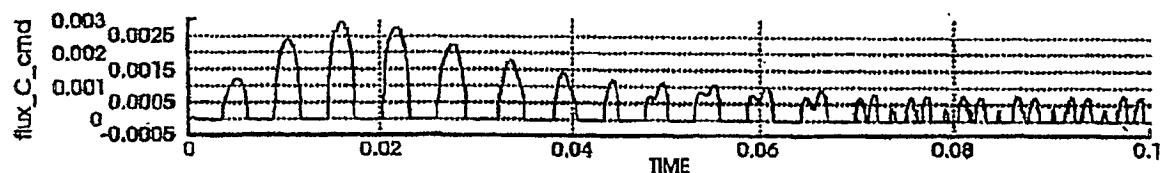


图 12A10

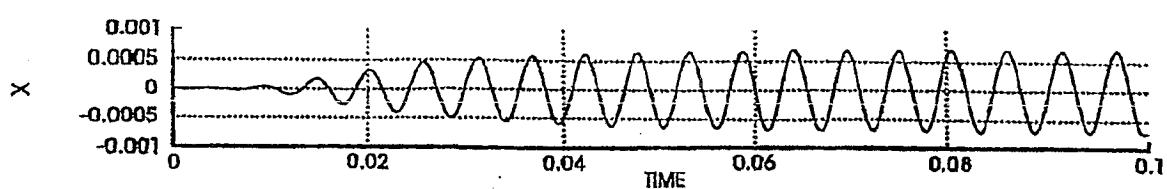


图 12B1

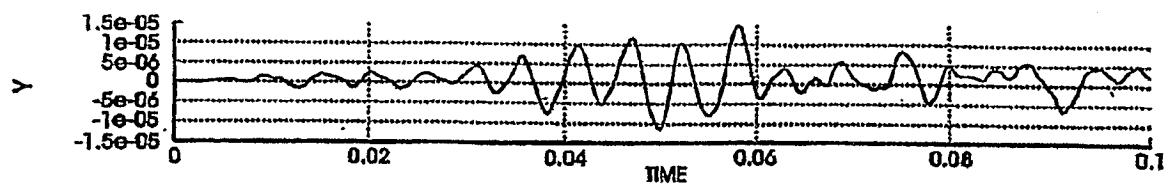


图 12B2

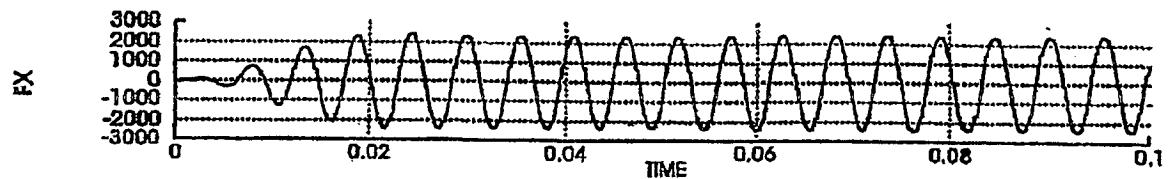


图 12B3

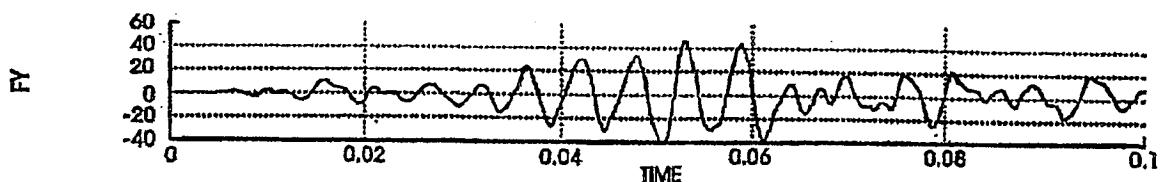


图 12B4

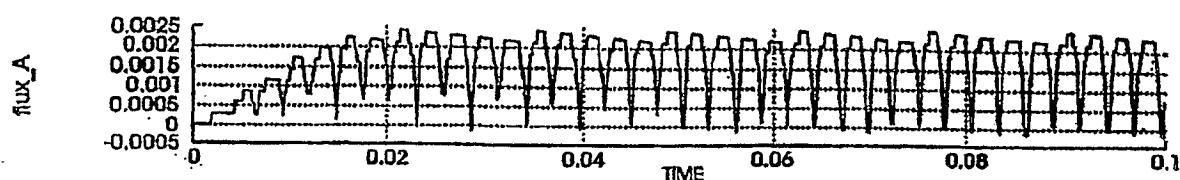


图 12B5

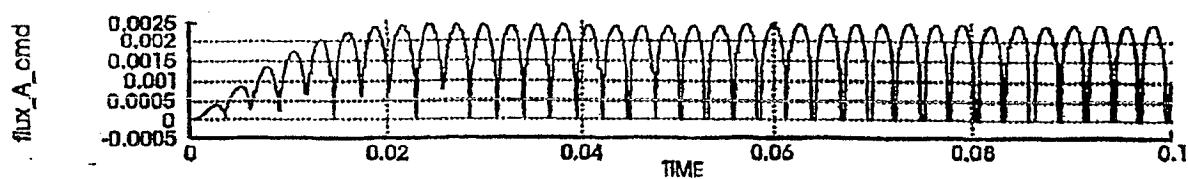


图 12B6

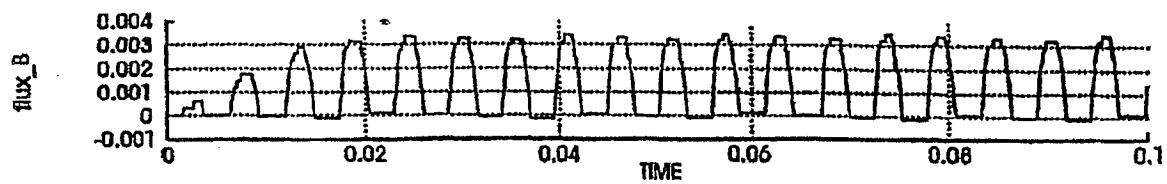


图 12B7

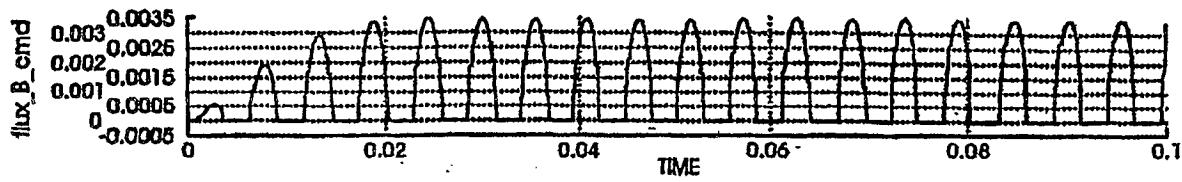


图 12B8

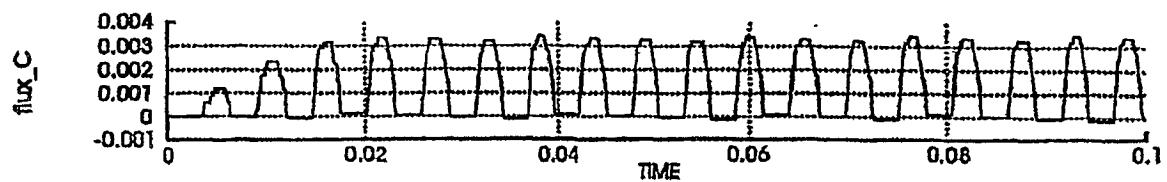


图 12B9

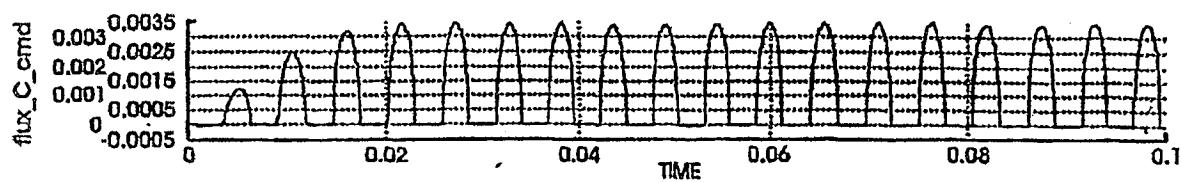


图 12B10

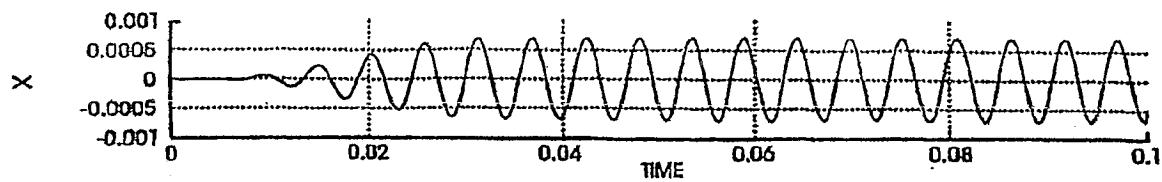


图 12C1

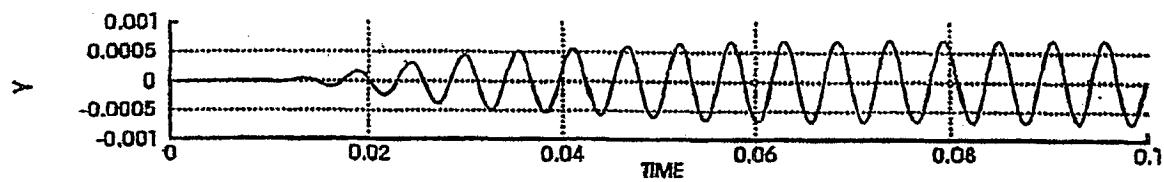


图 12C2

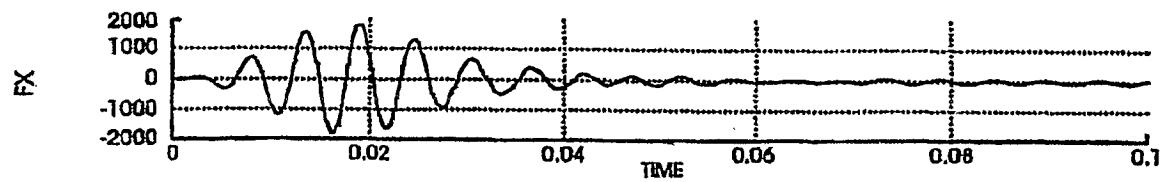


图 12C3

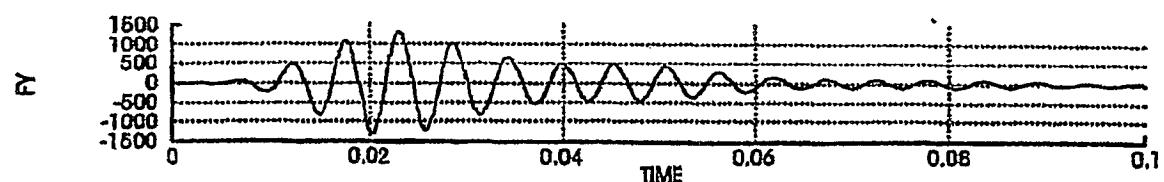


图 12C4

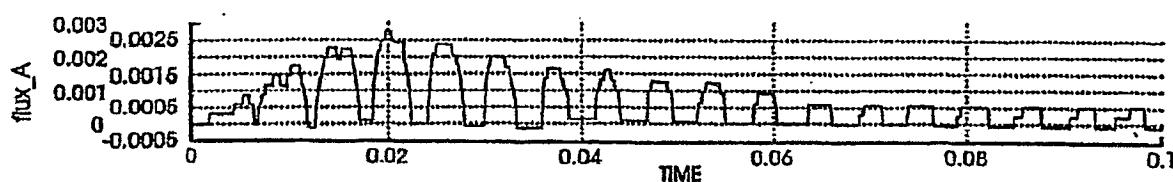


图 12C5

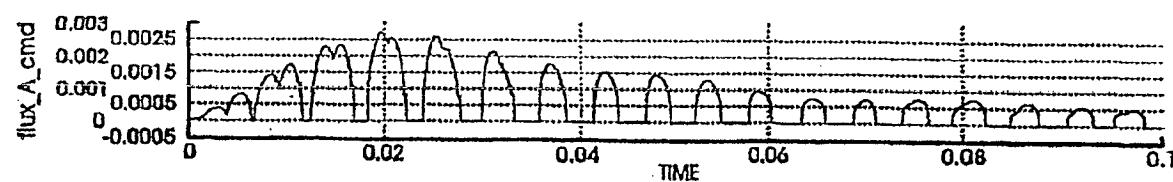


图 12C6

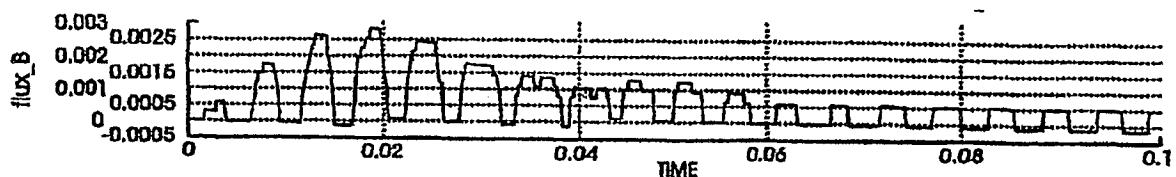


图 12C7

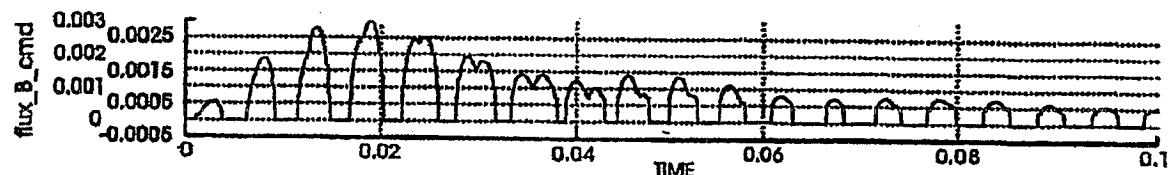


图 12C8

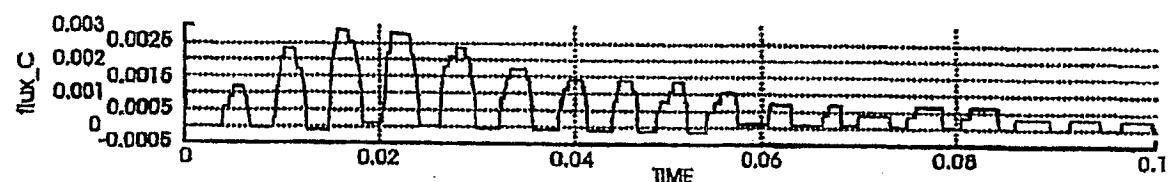


图 12C9

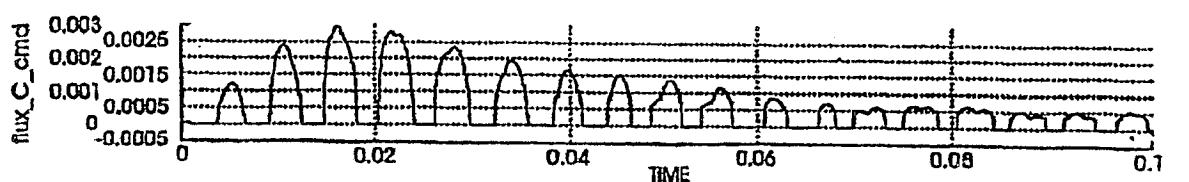


图 12C10

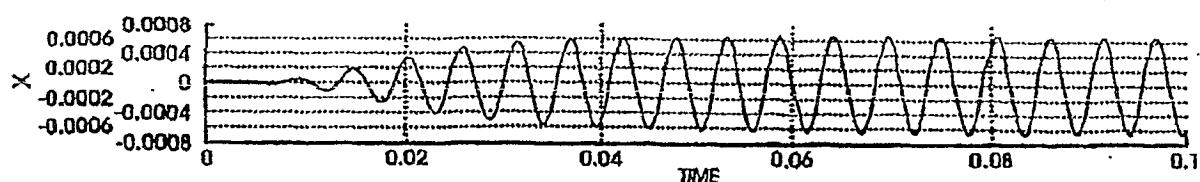


图 12D1

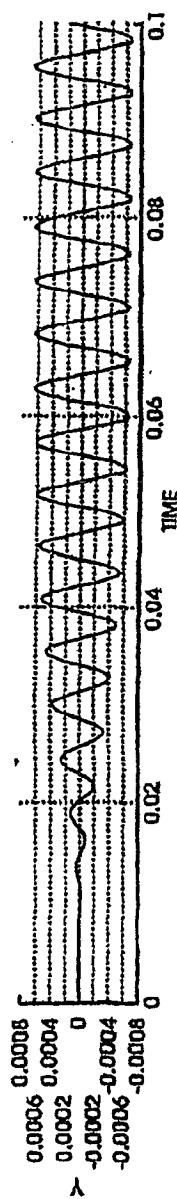


图 12D2

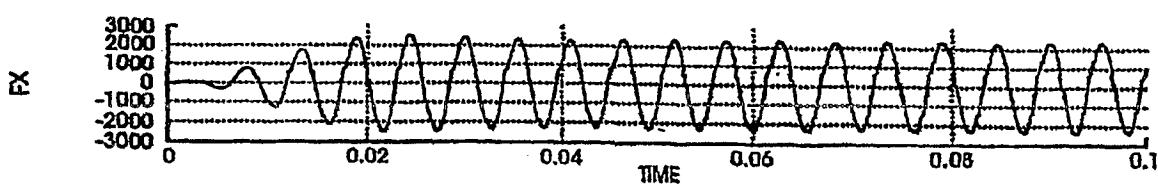


图 12D3

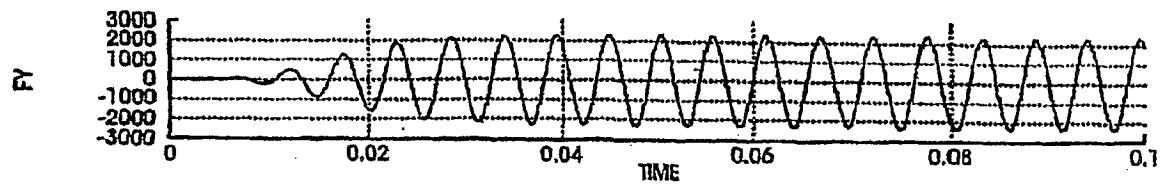


图 12D4

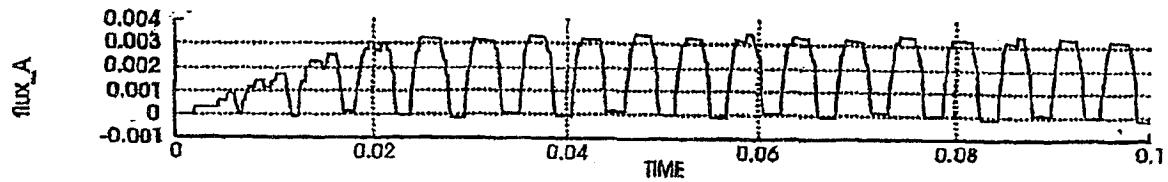


图 12D5

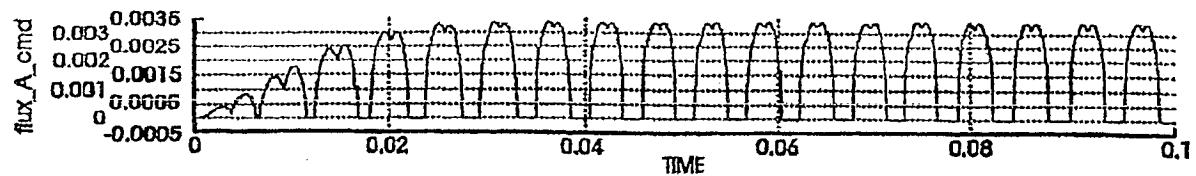


图 12D6

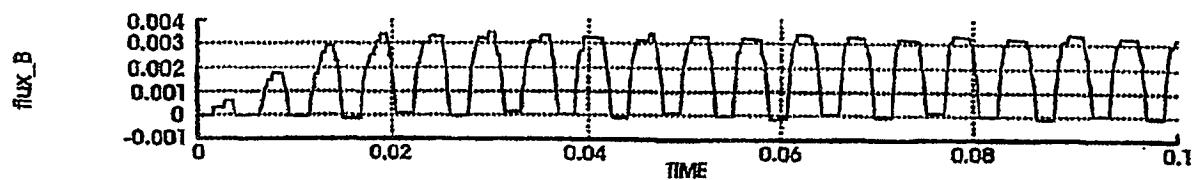


图 12D7

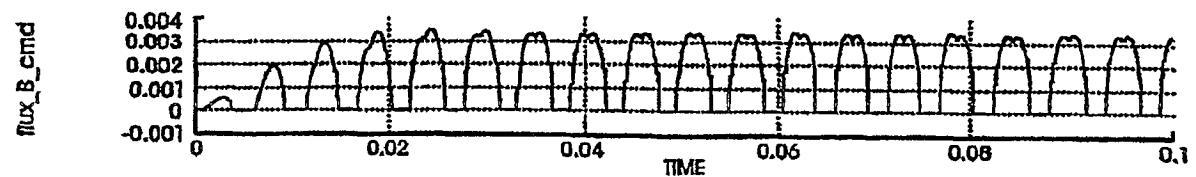


图 12D8

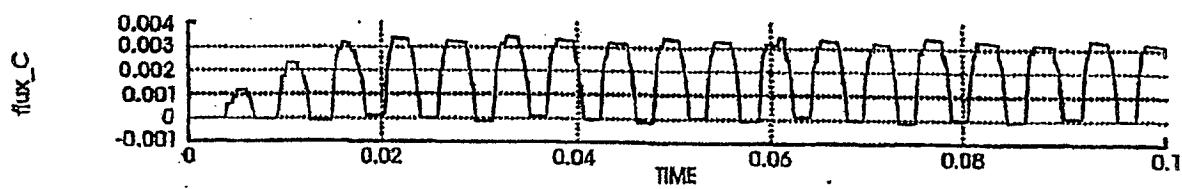


图 12D9

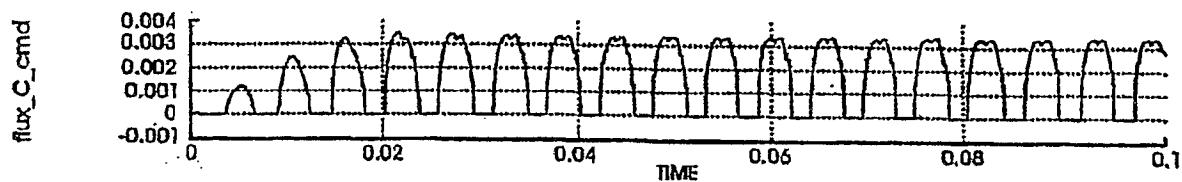


图 12D10

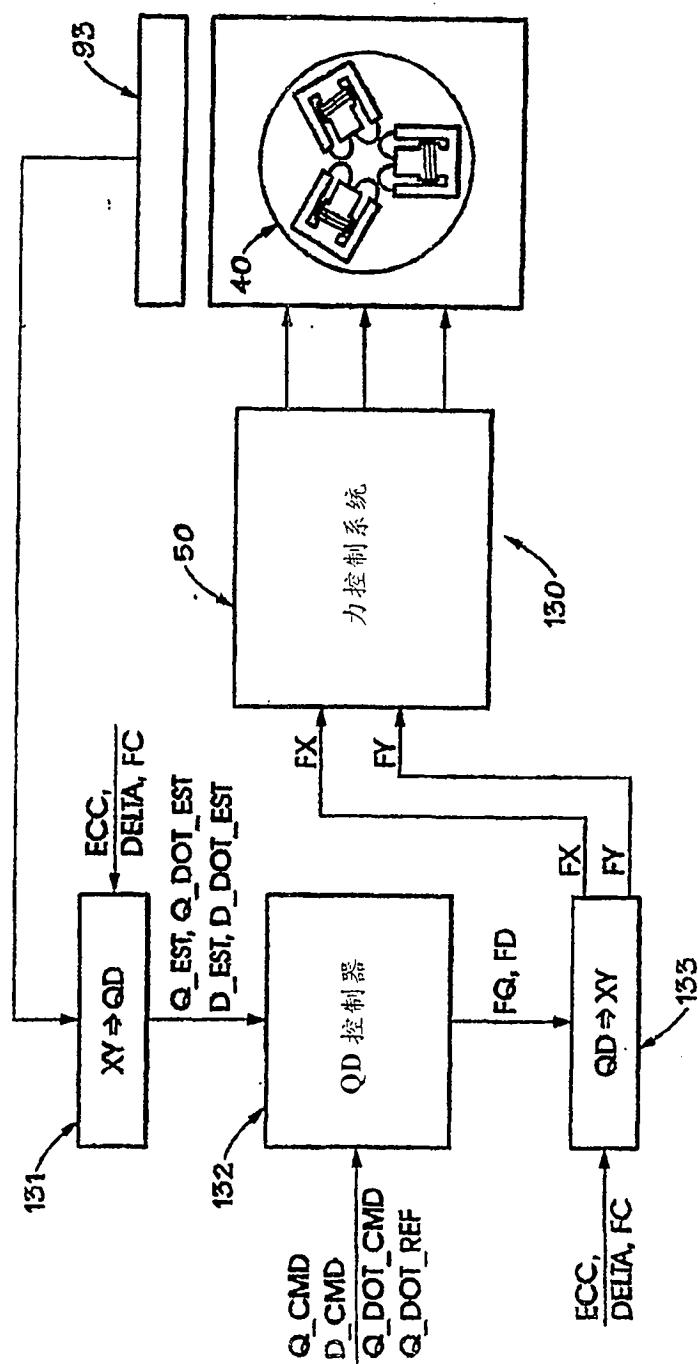


图 13

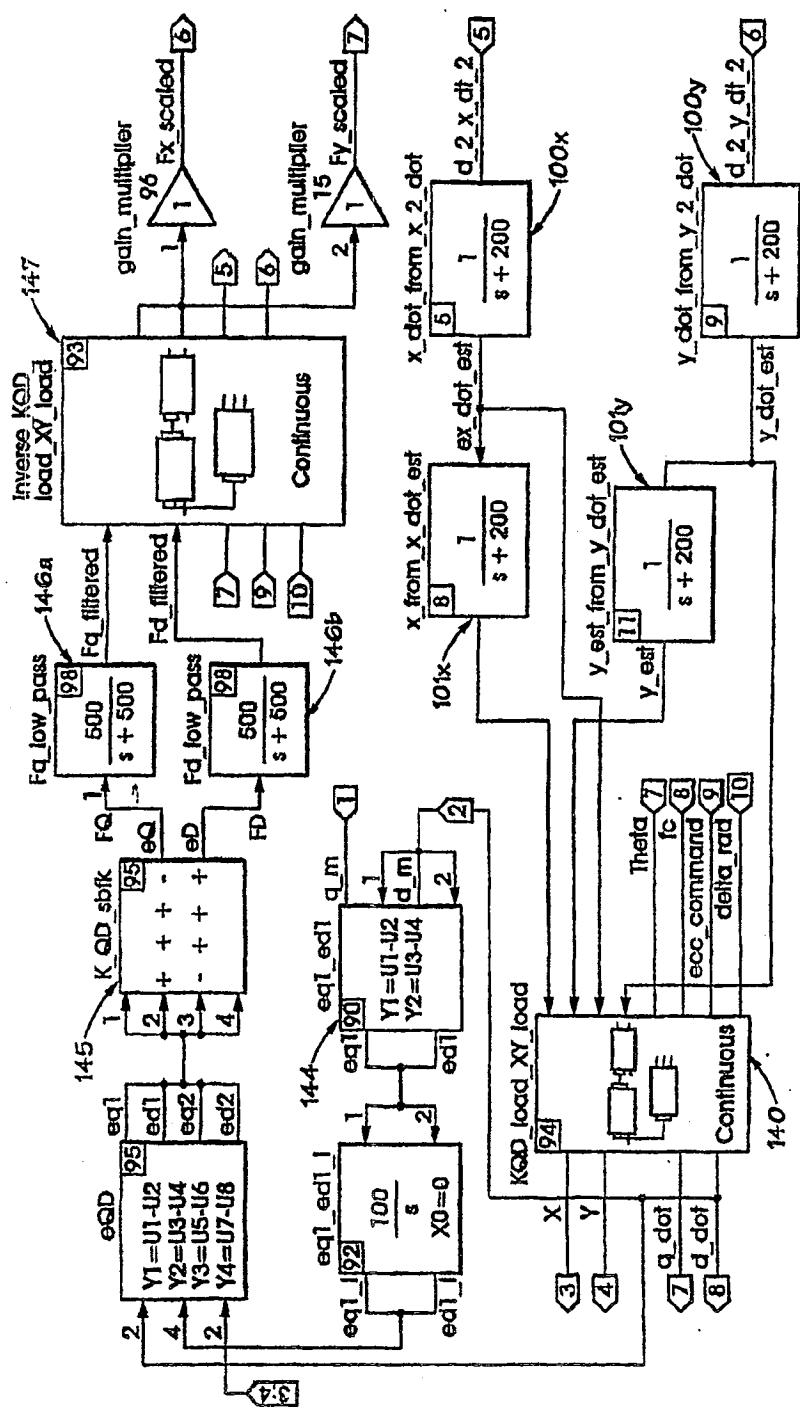


图 14A

类型=状态-空间系统			ID = 97
<input checked="" type="checkbox"/> 动能块名	K_QD_sfpk	0	
输入	4	输出	2
状态	0	状态	0
1.00D+05	9.19D+06	8000.	2x4 状态空间矩阵 %KQD_fpk
-9.19D+06	1.00D+05	400.	-400.
8000.			8000.
零初始条件：是			
输出外部信号			
1 "eq 1"	1 "eQ"		
2 "ed 1"	2 "eD"		
3 "eq 2"		注释	
4 "ed 2"		视图输入	颜色
		外部信号	0
		图标	交叉专用
		输入引脚	SHOW_ALL
		输出引脚	ON
		标签	<input checked="" type="checkbox"/> 完成
<input type="button" value="取消"/>			

图 14B

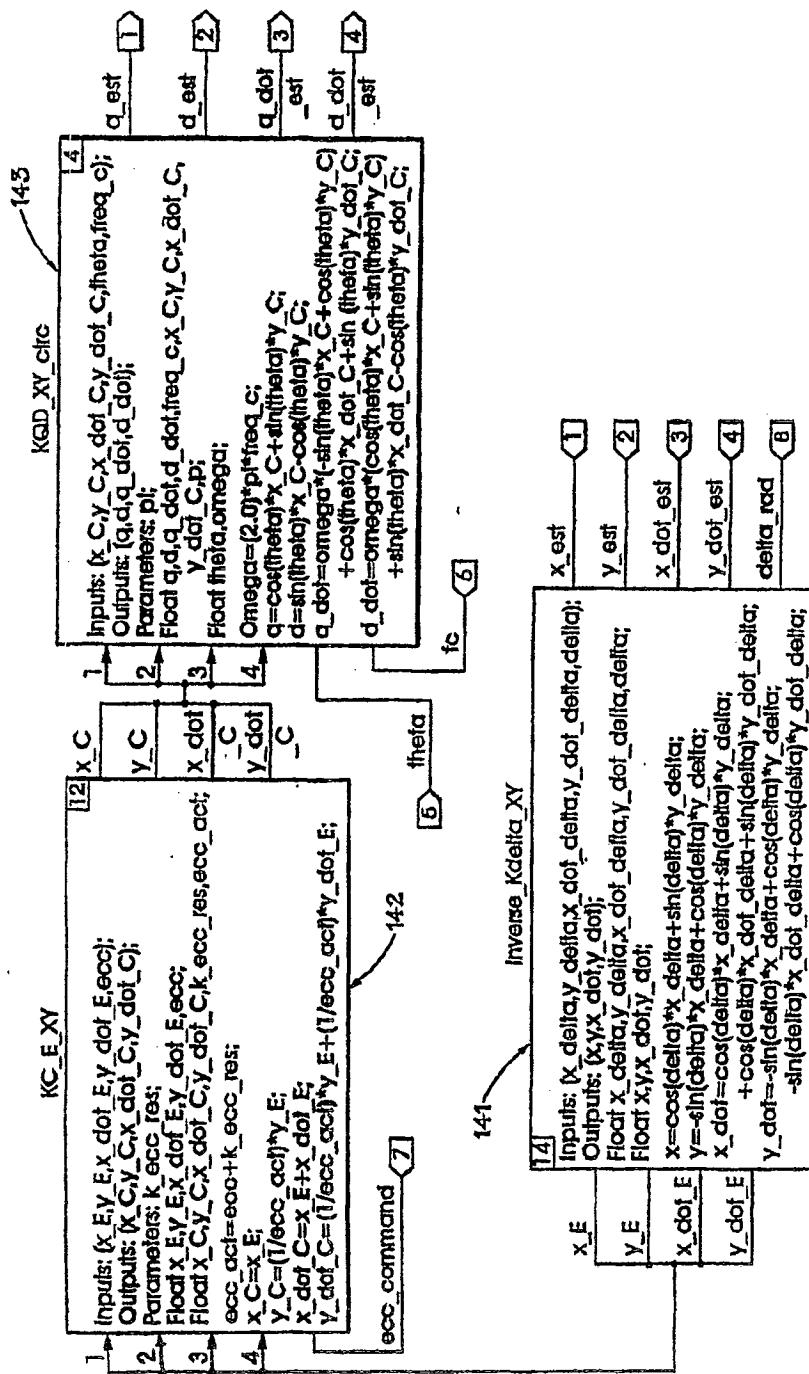


图 14C

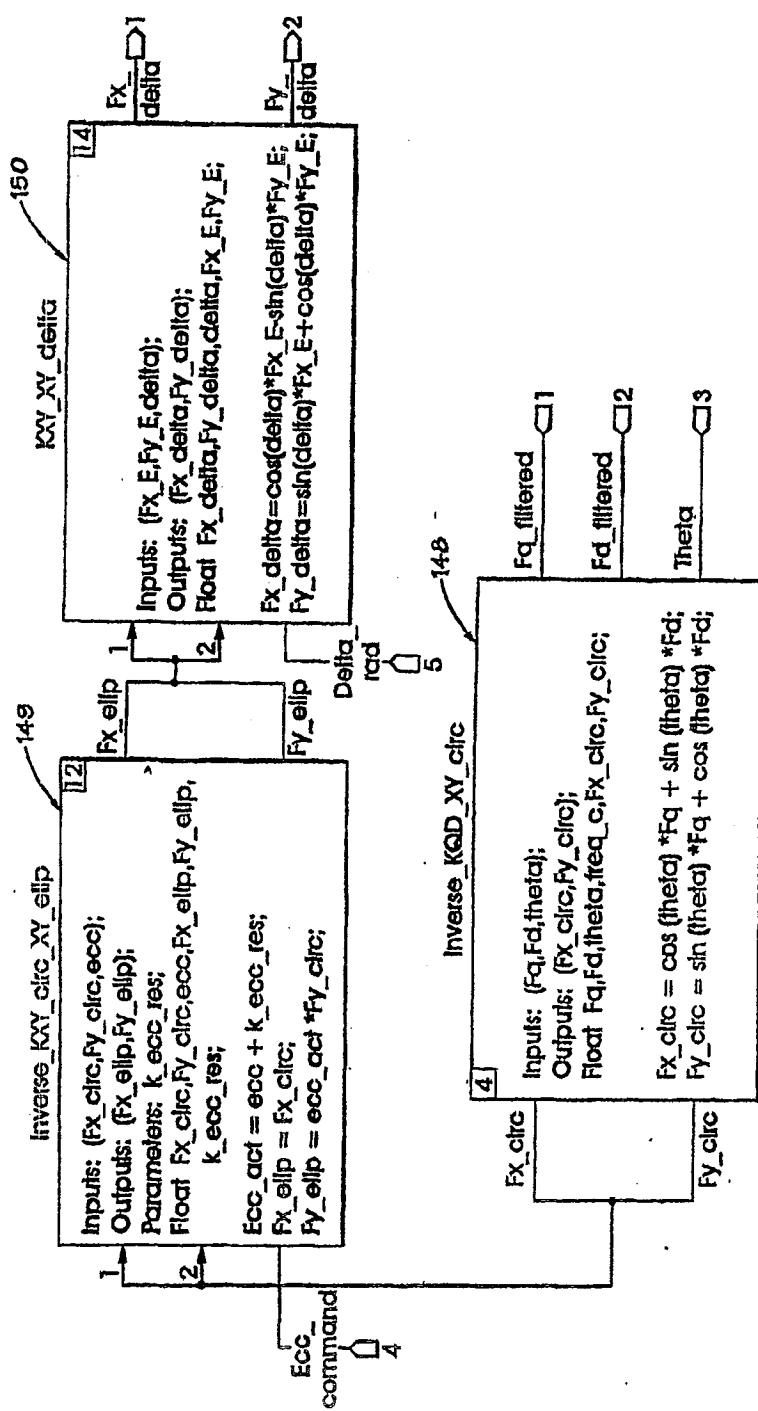


图 14D