



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 1674429 B

(45) 授权公告日 2011.01.26

(21) 申请号 200510059037.2

(22) 申请日 2005.03.23

(30) 优先权数据

10/810,538 2004.03.26 US

(73) 专利权人 伯斯有限公司

地址 美国马萨诸塞州

(72) 发明人 托马斯·A·弗罗施尔 罗杰·马克

托马斯·C·施罗德

理查德·T·卡尔马克

戴维·E·汉森 马俊

本杰明·G·K·彼得森

(74) 专利代理机构 北京市金杜律师事务所

11256

代理人 苏娟

(51) Int. Cl.

H02N 2/02 (2006.01)

H02N 2/04 (2006.01)

(56) 对比文件

EP 0954086 A2, 1999.11.03, 全文.

US 4703297 A, 1987.10.27, 全文.

US 2002/0175570 A1, 2002.11.28, 全文.

CN 1354551 A, 2002.06.19, 全文.

US 4602174 A, 1986.07.22, 全文.

EP 1089418 A1, 2001.04.04, 全文.

EP 1059424 A2, 2000.12.13, 全文.

US 2002/0008601 A1, 2002.01.24, 全文.

JP 特开 2001-23818 A, 2001.01.26, 全文.

审查员 宋洁

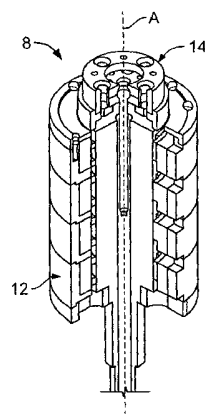
权利要求书 3 页 说明书 12 页 附图 15 页

(54) 发明名称

电磁致动器和包含该电磁致动器的系统

(57) 摘要

本发明公开了一种电磁致动器,该电磁致动器包括安装到中央柱上的定子组件。该中央柱由高透磁性材料制成,并且用作当电流通过定子组件中的线圈时产生的磁场的返回通路。当将电流施加到定子组件中的一个或多个线圈上时,产生与设置在衔铁组件中的一个或多个磁铁相互作用的磁场,并且该磁场导致衔铁相对于中央柱运动,从而例如打开或者关闭气门。



1. 一种电磁致动器,包括:
定子组件 (12),该定子组件具有限定有开口的内表面,该定子组件包括:
线圈导体 (23),被置于定子组件的内表面附近,其中所述线圈导体适于当施加电流时产生第一磁场;
由高透磁性材料制成并且具有纵轴的中央柱 (28);以及
至少部分地设置在定子组件开口中的衔铁组件 (14),所述衔铁组件包括:
永磁铁 (32,34),其中当将电流施加到线圈导体上时,该衔铁组件沿着平行于中央柱纵轴的方向移动,
所述电磁致动器的特征在于:
所述中央柱 (28) 的外表面作为所述衔铁组件的支承表面。
2. 如权利要求 1 所述的电磁致动器,其中所述永磁铁 (32,34) 被径向磁化。
3. 如权利要求 1 所述的电磁致动器,其中中央柱 (28) 包括多个部分,每个所述部分由高透磁性材料制成。
4. 如权利要求 1 所述的电磁致动器,其中定子组件的线圈导体 (23) 包括多个相邻的线圈导体 (20,22)。
5. 如权利要求 4 所述的电磁致动器,其中衔铁组件的永磁铁 (32,34) 包括:
多个相邻的径向磁化的永磁铁 (32,34)。
6. 如权利要求 5 所述的电磁致动器,其中所述相邻的永磁铁 (32,34) 具有相反的极性。
7. 如权利要求 4 所述的电磁致动器,其中所述相邻的线圈导体 (20,22) 构造成产生具有相反极性的磁场。
8. 如权利要求 4 所述的电磁致动器,其中所述多个线圈导体 (20,22) 串联连接。
9. 如权利要求 7 所述的电磁致动器,其中所述相邻线圈导体 (20,22) 以相反方向缠绕。
10. 如权利要求 7 所述的电磁致动器,其中所述相邻线圈导体 (20,22) 以相同方向缠绕,并且构造成接收相反的相对极性的电流。
11. 如权利要求 1 所述的电磁致动器,其中定子组件 (12) 还包括一个或多个由高透磁性材料制成的护铁部件。
12. 如权利要求 1 所述的电磁致动器,其中永磁铁 (32,34) 是环形的,并且限定有与中央柱 (28) 的纵轴平行的纵轴。
13. 如权利要求 12 所述的电磁致动器,其中永磁铁 (32,34) 的所述纵轴与中央柱的纵轴共轴。
14. 如权利要求 1 所述的电磁致动器,其中定子组件 (12) 限定有与中央柱 (28) 的纵轴平行的纵轴。
15. 如权利要求 1 所述的电磁致动器,其中定子组件 (12) 的纵轴与中央柱 (28) 的纵轴共轴。
16. 如权利要求 12 所述的电磁致动器,其中永磁铁 (32,34) 被径向磁化。
17. 如权利要求 12 所述的电磁致动器,其中永磁铁具有一个或多个不连续部分,从而主导涡电流通路被打断。
18. 如权利要求 12 所述的电磁致动器,其中永磁铁 (32,34) 包括多个弧形部分。
19. 如权利要求 1 所述的电磁致动器,其中衔铁组件 (14) 还包括气门杆 (50),该气门

杆适于在将电流施加给线圈导体时打开或者关闭气门。

20. 如权利要求 19 所述的电磁致动器,其中中央柱(28)限定有沟槽,并且所述气门杆(50)至少被部分置于该沟槽中。

21. 如权利要求 19 所述的电磁致动器,其中衔铁组件(14)还包括:

连接气门杆(50)与衔铁组件的其余部分的装置(38)。

22. 如权利要求 19 所述的电磁致动器,其中气门杆包括:

具有球形末端(44)的第一端(46);

并且其中衔铁组件还包括:

球窝接头组件(38),该球窝接头组件包括用于接纳所述气门杆的球形末端的球窝(45),从而至少沿着平行于中央柱(28)纵轴的方向,气门杆(50)被连接到球窝接头组件上。

23. 如权利要求 22 所述的电磁致动器,其中气门杆(50)被连接成使得气门杆在垂直于中央柱(28)纵轴的方向上具有运动自由度。

24. 如权利要求 22 所述的电磁致动器,其中气门杆(50)与球窝接头组件(38)连接,使得气门杆围绕中央柱(28)的纵轴具有旋转自由度。

25. 如权利要求 5 所述的电磁致动器,其中衔铁组件(14)还包括设置于各永磁铁(32,34)之间的一个或多个间隔件(36)。

26. 如权利要求 25 所述的电磁致动器,其中所述永磁铁(32,34)和间隔件(36)在轴向上分开。

27. 如权利要求 1 所述的电磁致动器,其中定子组件(12)的内表面的至少一部分涂敷有介电材料。

28. 如权利要求 1 所述的电磁致动器,其中中央柱(28)的外表面涂敷有低摩擦涂层。

29. 如权利要求 1 所述的电磁致动器,其中永磁铁(32,34)的轴向高度小于线圈导体(20,22)的轴向高度。

30. 如权利要求 1 所述的电磁致动器,其中永磁铁(32,34)的轴向高度大于线圈导体(20,22)的轴向高度。

31. 如权利要求 1 所述的电磁致动器,其中中央柱(28)由顺磁性材料制成。

32. 如权利要求 1 所述的电磁致动器,其中作为衔铁组件(14)相对于定子组件(12)位移的函数的衔铁组件(14)作用力在整个预定偏移范围上基本是恒定的。

33. 如权利要求 1 所述的电磁致动器,其中作为衔铁组件(14)相对于定子组件(12)位移的函数的致动器制动力分布,在整个位移的预定偏移范围上基本为零。

34. 如权利要求 1 所述的电磁致动器,其中中央柱(28)至少部分地由铁磁性材料制成。

35. 如权利要求 1 所述的电磁致动器,还包括:

冷却套管(52),该冷却套管至少部分围绕所述定子组件(12)设置,并且所述冷却套管限定一个或多个用来循环冷却流体的通道。

36. 如权利要求 1 所述的电磁致动器,其中所述中央柱(28)限定一个或多个用来循环冷却流体的通道。

37. 一种电磁气门致动系统,包括:

如权利要求 1 所述的电磁致动器(8),用于打开和关闭气门(37);

控制器 (506), 构造成接收关于气门一个或多个操作状态的信息, 将控制信号施加到线圈导体 (20, 22) 上, 从而产生导致衔铁组件相对于中央柱 (28) 纵轴运动的磁场, 其中该控制信号基于关于气门一个或多个操作状态的所述信息。

38. 如权利要求 37 所述的电磁气门致动系统, 其中所述一个或多个操作状态包括气门速度。

39. 如权利要求 37 所述的电磁气门致动系统, 其中所述一个或多个操作状态包括气门位置。

40. 如权利要求 37 所述的电磁气门致动系统, 其中控制器 (506) 接收关于气门 (37) 速度和位置二者的信号, 并选择性施加速度反馈控制和位置反馈控制来定位气门。

41. 一种内燃机, 包括:

限定出腔室的气缸 (2a);

适于控制流体流入或流出所述腔室的气门 (9, 9'); 以及

与气门连接用来操纵气门 (9, 9') 的如权利要求 1 所述的电磁致动器。

42. 如权利要求 41 所述的内燃机, 还包括:

控制器, 其构造成接收关于气门 (9, 9') 的一个或多个操作状态的信息, 将控制信号施加到线圈导体 (20, 22) 上, 从而产生导致衔铁组件 (14) 相对于中央柱 (28) 纵轴运动的磁场, 其中该控制信号基于关于气门一个或多个操作状态的所述信息。

43. 如权利要求 42 所述的内燃机, 其中所述一个或多个操作状态包括气门速度。

44. 如权利要求 42 所述的内燃机, 其中所述一个或多个操作状态包括气门位置。

45. 如权利要求 42 所述的内燃机, 其中控制器接收关于气门速度和位置二者的信息, 并选择性施加速度反馈控制和位置反馈控制来定位气门。

46. 如权利要求 41 所述的内燃机, 还包括:

冷却回路 (51), 该冷却回路包括:

热交换器 (55); 和

泵 (53), 该泵在所述电磁致动器 (57) 和热交换器之间循环冷却流体。

47. 如权利要求 46 所述的内燃机, 其中该电磁致动器还包括:

设置成至少部分围绕所述定子组件的冷却套管 (52), 该冷却套管具有一个或多个在电磁致动器 (57) 和热交换器 (55) 之间循环冷却流体的通道。

48. 如权利要求 46 所述的内燃机, 其中中央柱 (28) 还包括一个或多个冷却通道, 该冷却通道在电磁致动器 (57) 和热交换器 (55) 之间循环冷却流体。

电磁致动器和包含该电磁致动器的系统

技术领域

[0001] 本发明涉及电磁致动器。

背景技术

[0002] 一种内燃机通常包括多个气缸,每个气缸具有一套用来打开和关闭以使燃料和空气进入气缸并从气缸释放废气的气门。通常,内燃机的气门例如利用凸轮轴来机械受控。

发明内容

[0003] 在一个方面,本发明提供了一种电磁致动器,该电磁致动器包括具有纵轴并且由高透磁性材料(例如铁磁或者顺磁性材料)制成的中央柱。与该中央柱连接的是定子组件,该定子组件具有限定有开口的内表面。线圈导体被置于定子组件的内表面附近,并且构造成当施加电流时产生第一磁场。致动器还包括至少部分地设置在定子组件的开口中的衔铁组件。永磁铁设置于该衔铁组件中,并且当将电流施加到线圈导体组件上时,该永磁铁沿着平行于中央柱纵轴的方向移动。具有高透磁性材料制成的中央柱的一个优点在于,这使得致动器获得了比具有不带中央柱的相同磁路的致动器大的作用力输出。另一优点在于,中央柱也减小了磁路的磁通环路的空气间隙,从而得到比不带中央柱时更有效的磁路。

[0004] 多种实施例可包括以下一个或者多个特征。

[0005] 中央柱可由多个部分形成。中央柱也可作为衔铁组件的支承表面,并且涂敷有低摩擦涂层。

[0006] 衔铁组件的永磁铁可以是环形的,被径向磁化,并且可被定向成磁铁的环所限定的纵轴与中央柱的纵轴平行(或者同轴)。衔铁组件的永磁铁可在轴向上分开或者由多个部分(例如多个弧形部分)形成,以便打断磁铁的主导涡电流通路。

[0007] 衔铁组件还可包括气门杆,该气门杆适于在将电流施加给线圈导体时打开或者关闭气门。中央柱可限定其中至少放置气门杆的一部分的沟槽,从而作为气门杆的引导件。所述气门杆可与衔铁组件的其余部分连接,从而气门杆可在垂直于中央柱纵轴的方向上自由移动和/或围绕中央柱的纵轴自由旋转。气门杆可具有在一端形成的球形末端,该球形末端装配到安装于衔铁组件的球笼中,从而沿着平行于中央柱纵轴的方向将气门杆安装到衔铁组件的其余部分上。

[0008] 定子组件可包括多个线圈,这些线圈构造成相邻线圈产生相反极性的磁场。例如,所述多个线圈可串联连接,并且可缠绕成相邻线圈以相反方向缠绕。可选地,相邻线圈以相同方向缠绕,并且构造成接收相反的相对极性的电流。衔铁组件也可包括相应数量的永磁铁,所述永磁铁布置成相邻永磁铁具有相反的极性。间隔件置于每个永磁铁之间,并且磁铁和/或间隔件可以在轴向分开,从而打断主导涡电流通路。

[0009] 定子组件也可包括一个或多个由高透磁性材料制成的护铁部件,定子组件的内表面涂敷有介电材料。

[0010] 所述致动器可采用悬垂磁铁设计,其中磁铁的轴向高度(即相对于中央柱的纵轴

测量的磁铁高度)大于定子组件中的相应线圈导体的轴向高度。类似地,致动器可采用自下支承(underhung)设计,其中磁铁的轴向高度小于定子组件中的相应线圈导体的轴向高度。

[0011] 致动器可构造成作为衔铁相对于定子组件位移的函数的衔铁作用力在整个预定偏移范围上基本是恒定的。致动器也可构建成作为衔铁相对于定子组件位移的函数的致动器制动力(detent force)分布在整個位移的预定偏移范围上基本为零。

[0012] 致动器可构造成形成冷却回路的一部分,并且包括冷却套管(cooling jacket),该冷却套管设置成至少部分围绕所述定子组件并且循环冷却流体。中央柱也可包括一个或多个构造成来循环冷却流体的通道。

[0013] 致动器也可构造成打开和关闭气门,并且控制器可与该致动器电连接来控制致动器的操作。控制器可构造成接收关于气门一个或多个操作状态(例如气门速度、加速度和/或位置)的信息,基于所接收到的信息将控制信号施加到线圈上,从而产生导致衔铁组件相对于中央柱纵轴运动的磁场。控制器可接收关于气门速度和位置的信号,并选择性施加速度反馈控制和位置反馈控制来定位气门。

[0014] 在另一方面,本发明提供了一种用于控制电磁气门致动器的方法,该电磁气门致动器具有限定有纵轴的定子和设置在该定子中的衔铁,所述方法包括:接收关于气门速度和位置的信号,并通过选择使速度反馈回路和位置伺服反馈回路生效来向所述致动器施加控制信号,从而将气门定位到所需位置。

[0015] 多种实施例可包括以下一个或多个特征。速度反馈回路可用于降低气门速度。气门的所需位置可以是气门全开或者全关的位置。所述方法可包括使速度反馈回路生效来在给定衔铁位移处补偿制动力。

[0016] 在另一方面,本发明提供了一种内燃机,该内燃机包括限定出腔室的气缸、适于控制流体或气体流入或流出所述腔室的气门、以及与气门连接用来控制气门操作的电磁致动器。所述致动器包括具有限定有开口的内表面以及靠近该内表面设置的线圈导体的定子组件、由高透磁性材料(例如顺磁或者铁磁材料)制成并且限定有纵轴的中央柱。致动器还包括至少部分地设置在定子组件的开口中的衔铁组件,当将电流施加到所述线圈导体组件上时,所述衔铁组件在平行于中央柱纵轴的方向上移动。

[0017] 多种实施例可包括以下一个或多个特征。所述内燃机还可包括控制器,该控制器构造成接收关于气门一个或多个操作状态(例如气门速度、加速度和/或位置)的信息,基于所接收到的信息将控制信号施加到线圈上,从而产生导致衔铁组件相对于中央柱纵轴运动的磁场。控制器可接收关于气门速度和位置的信号,并选择性施加速度反馈控制和位置反馈控制来定位气门。

[0018] 内燃机可还包括冷却回路,该冷却回路包括热交换器和泵,该泵在所述电磁致动器和热交换器之间循环冷却流体。电磁致动器也可包括冷却套管,该冷却套管设置成至少部分围绕所述定子组件并且具有一个或多个在电磁致动器和热交换器之间循环冷却流体的通道。电磁致动器也可包括一个或多个设置在中央柱中的冷却通道,该冷却通道在电磁致动器和热交换器之间循环冷却流体。

[0019] 根据上述公开内容设计的电磁致动器可用于内燃机中来可变和独立控制内燃机的吸气和排气气门。在内燃机中使用致动器的一个优点在于,不需要辅助马达(例如启动

器马达)就能使内燃机启动。在内燃机中使用这种致动器的另一优点在于,能通过使内燃机停机而改善内燃机的排放,否则内燃机将空转(例如当汽车在红绿灯处停车时)。

[0020] 虽然在内燃机的上下文中描述了下述致动器,但应该明白这里所公开的教导不局限于内燃机中的气门控制,而可以应用于广泛的多种应用。

[0021] 在附图和下面的描述中将阐明本发明的一个或多个实施例的细节。本发明的其他特征、目的和优点将从说明书和附图、以及从权利要求书中明了。

附图说明

[0022] 图 1A 是一内燃机的示意图;

[0023] 图 1B 是一内燃机的腔室的示意图;

[0024] 图 2A-2H 是一电磁致动器的示意图;

[0025] 图 3A 是用于电磁致动器的一冷却回路的示意图;

[0026] 图 3B 是用于电磁致动器的冷却套管的示意图;

[0027] 图 3C 是带有穿过中央柱的冷却回路的致动器的示意图;

[0028] 图 4A-4I 是另一电磁致动器的示意图;

[0029] 图 5A 示出用于悬垂和自下支承磁铁设计的模拟加速度相对于位置的分布;

[0030] 图 5B 示出用于悬垂和自下支承磁铁设计的模拟作用力相对于位置的分布;

[0031] 图 5C 示出用于悬垂和自下支承磁铁设计的模拟致动力特性;

[0032] 图 6 是一用于电磁致动器的控制系统的示意图;

[0033] 图 7 是一框图,示出了用于电磁致动器的闭合回路控制系统;

[0034] 图 8 示出了在电磁致动器的一个实施例中施加到一套定子线圈上的控制电流与衔铁位移之间的关系。

[0035] 在附图中,相同的附图标记指代相同的元件。

具体实施方式

[0036] 如在图 1A 中所示,内燃机 1 包括多个气缸,例如 2a-2b,每个气缸容纳有活塞,例如 4a-4b。而每个活塞利用连杆例如 6a-6b 与曲轴 5 机械连接。每个气缸,例如气缸 2a,如图 1B 所示包括吸气气门 9、排气气门 9'、火花塞 7 和燃料喷射器元件 10,每个至少部分位于气缸的腔室 11 中。控制单元(未示出)通过分别控制吸气气门致动器 8 和排气气门致动器 8'来控制吸气气门 9 和排气气门 9'。控制单元也命令燃料喷射器将合适量的燃料-空气混合物喷入腔室 11 中,利用火花塞 7 在合适的时刻点燃燃料-空气混合物,然后通过气门致动器 8 关联的排气气门排来自燃料-空气混合物燃烧的废气。根据在 David Hanson、Jun Ma、Benjamin G. K. Peterson、Geoffrey Coolidge Chick 的与本申请同时提交的名称为“Controlled Starting and Braking of an Internal Combustion Engine(内燃机受控启动和停机)”的专利申请中描述的方法,控制单元可控制气门的操作、燃料的运送和火花塞的点火,该申请的内容在此完全引入作为参考。

[0037] 每个气门致动器,例如如图 2A 所示的气门致动器 8,包括位于定子组件 12 中的衔铁组件 14。在致动时,衔铁组件 14 沿着定子组件 12 的纵轴 A 滑动以打开(或者关闭)气门(在图 2A 中未示出)。

[0038] 如图 2B 所示, 定子组件 12 包括安装到中央柱 28 上的外壳体 29。中央柱 28 是中空管状结构, 该结构延伸到外壳 29 以外, 并且用作安装到衔铁组件上的气门杆 (如图 2G-2H 所示) 的引导件。除了用作气门杆的引导件, 中央柱由具有高透磁性的材料制成, 并且为在电流通过线圈导体组件 23 时产生的磁场提供了磁返回通路。联接凸缘 30 将中央柱 28 与外壳 29 机械联接。

[0039] 外壳 29 包括被互锁护铁部件 24 包围的线圈导体组件 23。一系列螺钉, 例如 27a-27b, 通过帽 26 将互锁护铁部件固定在合适的位置上。在该特定实施例中, 线圈导体组件 23 包括沿着相反方向缠绕并且串联连接的两对圆形铜线线圈 20 和 22 (例如线圈 20 顺时针缠绕, 线圈 22 逆时针缠绕, 或者反之), 并且在将来自单个驱动电路的电流施加到线圈上时, 线圈产生相反极性的磁场。换句话说, 当将电流施加到线圈上时, 一对线圈 (例如线圈对 20) 将产生一个极性的磁场, 第二对线圈 (例如线圈对 22) 将产生相反极性的磁场。这两对线圈在定子组件中交替布置, 从而成对的线圈 (例如线圈对 20) 不会彼此相邻。如下文更详细解释的, 交替的缠绕线圈 20、22 与衔铁中交替的相关极性的磁铁对准。当将电流施加到线圈 20、22 上时, 磁场在外壳和中央柱之间形成, 这使得磁化的衔铁沿着致动器的纵轴 A 滑动。相邻线圈和磁铁的交替极性用作彼此的磁通返回通路。

[0040] 在另一实施例中, 所有的线圈和线圈导体组件沿着相同的方向缠绕, 并且供送有交替极性的独立电流信号以便产生一系列交替磁场。其他实施例可采用产生相反极性或者相同极性的一个或者多个线圈。线圈 20、22 可由具有多种横截面形状, 例如圆形、椭圆形、矩形或者方形的导体 (例如线或者导体带) 构成。

[0041] 如图 2C 所示, 每个衔铁组件 24 包括三个圆周部分 25a-25c。圆周部分的使用允许在提供电力时铜线圈径向热膨胀, 从而降低了护铁部件 24 破碎的风险。护铁部件 24 朝向衔铁组件引导由电导体产生的磁场, 而中央柱 28 有利地作为在电流经过线圈时产生的磁路的返回通路。通过将中央柱作为磁路的磁返回通路, 致动器获得了比具有相同磁路而没有中央柱的致动器更大的作用力输出。中央柱也减小了磁路通量回路的空隙间隙, 导致比没有中央柱的致动器更高效的磁路。为了使中央柱用作磁返回通路, 该中央柱应该由具有高透磁性的材料制成, 诸如铁磁材料或者顺磁性材料。

[0042] 定子组件 12 的含铁元件, 包括中央柱 28 和护铁部件 24, 优选地由具有高透磁性和高磁饱和特性的材料构成。优选地, 使用具有高电阻率的材料, 以便减小铁元件的动态损失。诸如硅钢合金或者软磁性合成物的材料提供了高透磁性和饱和特性, 并且具有高电阻率, 可用来形成中央柱 28 或者致动器的其他含铁元件。

[0043] 在优选实施例中, 护铁部件 24 和中央柱 28 由粉末金属软磁性合成物 (SMC) 材料 (诸如由总部在 West Lebanon, NH 的 Mii Technologies, LLC 生产的 SM2 或者 SM3, 或者由总部在 Hoganäs, Sweden 的 Hoganäs 生产的 Somaloy™500) 制成, 该材料具有高电阻率和高透磁性的结合。

[0044] 中央柱 28 可形成单件结构 (如图 2B 所示) 或者合成地由多个同类或者异类材料部分制成。由多个分立部分形成中央柱 28 与单件结构相比将增加中央柱 28 的电阻率, 并且降低对涡电流的磁化系数。

[0045] 提供定子和中央柱之间的机械连接的联接凸缘、以及将护铁固定到位的帽 26 优选地由非磁性、带有更低的对涡电流的磁化系数的电阻材料, 诸如奥氏体不锈钢制成。

[0046] 定子组件优选地涂敷有灌封环氧树脂 (potting epoxy) 或者其他高强度、高介电粘合材料,这有助于使线圈在定子组件中固定,防止线圈物理磨损并且为护铁部件 24 提供电绝缘。填充环氧树脂可经由辅助注入步骤施加,其中致动器和围绕的夹具被放置在真空中,同时经由入口管引入填充环氧树脂,利用溢流管指示完全装满。

[0047] 在另一实施例中,护铁部件的内表面涂敷有介电材料,从而为致动器提供电绝缘。用于涂敷这些部件的内表面的一种技术是首先利用大约 0.001 英寸的介电漆电涂敷所述表面,然后用大约 0.002-0.004 英寸的环氧基粉末涂层涂敷。该技术在线圈和线圈可能接触的结构之间提供了防止电压击穿的冗余保护。除了涂敷护铁部件的内表面,定子组件的整个内表面可涂敷有高介电强度的填充环氧树脂或者薄膜材料,诸如粘接到表面上的薄 Kapton[®] 聚酰亚胺薄膜 (由总部在 Circleville, OH 的 DuPont HighPerformance Materials 生产)。该材料层在衔铁组件的外表面和定子组件的内表面之间提供了电绝缘,并且用作定子组件 12 的内表面和该其所暴露于的诸如机器润滑油的任何冷却流体之间的物理屏障。

[0048] 另外,中央柱也优选地涂敷有低摩擦保护层,诸如无电镀镍涂层,从而改善在使用中衔铁沿着中央柱滑动时衔铁和定子组件的承载和磨损性质。

[0049] 参见图 2D-2F,衔铁组件 14 包括径向磁化的两对永磁铁 32、34,这些磁铁具有沿着磁铁的内圆周第一磁极和沿着其外圆周的磁极。在一实施例中,如图 2F 所示,一对磁铁具有南-北磁极 (诸如磁铁对 32),而第二对具有北-南磁极 (诸如磁铁对 34)。与定子组件 12 中的线圈对相似,两对磁铁在衔铁组件 14 中交替布置,使得成对的所述磁铁 (例如磁铁对 34) 彼此相邻。虽然图示磁铁的径向截面在示例设计中具有圆形横截面,但其他实施例可使用具有其他截面形状的磁铁。

[0050] 参见图 2D,衔铁组件 14 包括介于相邻磁铁之间的磁铁间隔件 36 和一系列夹子 40,所述夹子 40 联接相邻的间隔件 36,从而将磁铁 32、34 固定到位。磁铁间隔件 36 优选地由高模数、具有高电阻率的低密度材料,诸如钛制成。在该实施例中,夹子 40 为衔铁组件的内直径提供支承表面并且可涂敷低摩擦涂层,诸如钻石类碳 (DLC) 涂层。在另一实施例中,间隔件的内直径和外直径可稍微延伸到磁铁的内直径和外直径之外,从而在操作过程中承载摩擦负荷。在该实施例中,间隔件的承载表面优选地涂敷有低摩擦涂层 (例如 DLC,二硫化钼)。

[0051] 磁铁 32、34 中的每一个和间隔件 36 在轴向方向上分离,从而打断主导涡电流通路,这有助于减少动态损失。其他实施例可使用由多个弧形部分形成的磁铁和 / 或间隔件,这对于每个元件在主导涡电流中产生了多重不连续。虽然图示出四个磁铁和线圈,但其他实施例可在这些部件的布置和磁化上采用多种数目和结合。

[0052] 衔铁组件 14 也可包括球窝接头组件 38 和连接件 42,该连接件将气门杆组件 50 连接到衔铁组件 14 的剩余部分上。多个夹子 40 将连接件 42 安装到衔铁组件 14 的其他部分上。夹子 40 可利用诸如环氧基粘合剂的粘合剂进一步粘接到间隔件 36 和连接件 42 上。

[0053] 参见图 2E,球窝接头组件 38 包括球笼 45 和气门杆组件 50,该气门杆组件包括上杆 46 和下杆 48。上杆 46 的一端具有球形状 44,而另一端具有外螺纹 (未示出)。上杆 46 的球形状端部装配到球笼 45 中,上杆 46 的外螺纹端部旋入下杆 48 中的匹配内螺纹中。球窝接头组件 38 用来沿着轴向将衔铁 14 连接到气门杆 50 上,而在诸如两个其他平移方向和

三个旋转方向的其他方向上保持不连接。其他实施例可使用其他机械组件来将气门杆连接到衔铁组件的其余部分上,其中在一些方向上连接,其他方向上不连接,从而避免过多约束该机械组件。

[0054] 利用与线圈和定子组件 12 的含铁元件成对的永磁铁,两种磁源作用来在定子内以线性运动移动衔铁组件 14。如上所述,与线圈导体组件类似,径向磁化的相邻磁铁被相反极化。衔铁的其他元件是非运动产生元件,并且用来产生磁铁的轴向间隙,并且在磁铁和气门杆之间提供机械连接。磁铁和线圈的轴向间隙取决于设计的预定偏移(intended excursion)和线圈与磁铁轴向高度之间的所需位置关系。总之,在对应于越过该偏移的最恒定作用力输出的行程的极限端处,每个磁铁的顶部和底部将停留在其匹配线圈和护铁材料的轴向位置(定义为在轴向上测量的、从线圈底部到顶部的线圈的距离)上。

[0055] 当将电流施加给定子组件 20、22 的线圈上时,由线圈产生的磁场导致衔铁组件 14 在(相对于图 2A 的)向上或者向下方向上移动。作为示例,如果衔铁磁铁具有如图 2F 中所示的极性,并且电流沿着顺时针方向流经线圈 20,沿着逆时针方向流经线圈 22,则衔铁组件 14 将在向下方向上移动。参见图 2H,随着衔铁组件 14 向下移动,气门杆 50 推动气门 37 到完全打开位置。类似地,如图 2G 所示,当电流反向时,衔铁组件 14 被向下拖动,导致气门杆拖动气门抵靠阀座 39,从而关闭气门。

[0056] 衔铁组件 14 相对于中央柱 28 的滑动为可导致退磁的磁铁 32、34 提供了重要的热通路。因此用于磁铁 32、34 的材料选择在对于提供更高致动器作用力输出的高能量产品的需求和磁特性的稳定性之间平衡。在优选实施例中,由于钕铁硼磁铁所具有的能量密度和可径向磁化的能力,而选择钕铁硼磁铁。高强制力特性对于存在退磁影响时材料的稳定性是重要的,所述退磁影响例如为外部施加的磁场和高温。其他实施例可使用由结合了稀土金属的永磁体材料成分制成的磁铁,所述稀土金属例如为钕或者钐钴。其他合适材料的例子包括 Nd35、Nd38、Nd42、Nd30,由总部在 Edmore, MI 的 Hitachi Magnetics Corporation 生产。

[0057] 除了摩擦产生热量,由磁通密度的快速变化引发的涡电流产生另外的热能。如上所述,中央柱和护铁部件可由多个弧形部分形成,这些弧形部分打断了主导涡电流的通路。而且,可选择同时具有高透磁性和高电阻率的材料来形成中央柱和护铁部件,诸如 SMC 或者 Somaloy500 材料,从而进一步减少动态损失。除了这些技术,致动器也可包括冷却系统来在使用过程中有效冷却致动器。

[0058] 例如,如图 3A 所示,冷却系统 51 包括在热交换器 55 和一个或者多个致动器 57 之间循环冷却流体以从致动器去除热量的泵 53,所述冷却流体例如为水、50/50 乙二醇/水混合物、机器润滑油或者其他冷却流体。用于在致动器中循环冷却流体的技术是通过围绕定子组件(未示出)的外表面放置冷却套管,诸如图 3B 所示的冷却套管 52,从而形成部分冷却回路。诸如热油脂、具有高导热性的灌注混合物、导热弹性体或者导热胶带的具有高导热性的材料可用于消除冷却套管 52 与定子组件之间的间隙。冷却套管 52 可与泵 51 和热交换器 55 连接以形成一冷却回路。

[0059] 其他实施例可使用其他公知的冷却系统,诸如热泵,以便从致动器去除热量。在一车辆应用中,汽车运动产生的气流可在致动器上方被引导以提供强制对流冷却。也可使用辅助风扇。

[0060] 冷却回路也可在致动器的中央柱中形成。例如,如图 3C 所示,可将薄壁导管设置在形成于中央柱 63 中的孔内。泵 51(在图 3A 中示出)可通过中央柱中的该导管 61 和热交换器 55 循环冷却流体,从而从中央柱去除热量。

[0061] 冷却系统可以是独立的冷却系统,或者是已经存在于使用所述致动器的应用中的冷却系统的一部分。例如,如果致动器用来控制内燃机中的吸入、排出或者燃料喷射阀,则内燃机可设计成冷却系统例如通过经由冷却套管和/或设置在中央柱中的导管循环冷却流体来冷却致动器。通过利用内燃机的冷却系统冷却致动器,不需要独立的热交换器或者泵。但在一些应用中,可能需要对致动器的温度进行更好的控制,因此对于一个或者多个致动器可应用独立的冷却系统。例如,单个的致动器可具有其自身单独的冷却系统,或者同一冷却流体可流经与一中央热交换器连接的多个致动器。

[0062] 对于内燃机上的应用,需要使致动器从内燃机主机到致动器热隔绝,从而从内燃机主机向致动器热交换。在该方面,将由诸如陶瓷或者高温塑料的低导热性材料制成的隔热体放置在致动器和内燃机主机之间。

[0063] 还需要将气门杆(在内燃机气缸中暴露于燃烧环境)与致动器的其余部分热隔离。在该点上,气门杆优选地由具有低导热性的材料制成,诸如钛。

[0064] 如图 4A-4G 所示,另一实施例的特征在于致动器 60 包括定子组件 62 和衔铁组件 66,该定子组件具有带有三个线圈 64a-64c 的线圈组件,该衔铁组件具有三个对应的径向磁化永磁铁 68a-68c。线圈 64a-64c 构建成使得相邻线圈产生相反极性的磁场。在该实施例中,线圈 64a-64c 串联连接,并且最上面和最下面的线圈,即线圈 64a 和 64c 沿一个方向(例如顺时针方向)缠绕,位于定子组件中间的线圈,即线圈 64b 沿着相反方向(逆时针方向)缠绕。因此,当电流施加到线圈上时,相邻线圈产生具有相反极性的磁场。在该实施例中的线圈由圆形铜线制成,但其他实施例可由导电带或者具有不同截面面积或者形状的线制成。

[0065] 衔铁组件 64 的磁铁 66a-66c 构建成相邻磁铁具有相反的径向磁化。换句话说,最上面和最下面的磁铁,即磁铁 66a 和 66c 具有第一径向极性(例如北-南),二在衔铁组件中间的磁铁,即磁铁 66b 具有相反的径向极性(例如南-北)。在该实施例中,致动器 60 使用悬垂设计,其中磁铁 66a-66c 的轴向高度大于对应线圈 64a-64c 的轴向高度。

[0066] 参照图 4B,定子组件 62 除了包括三个线圈 66a-66c 以外,还包括中央柱 70 和一系列互锁护铁部件 72。中央柱 70 由具有高透磁性的材料(例如 SMC)制成,并且用作由线圈产生的磁场的磁返回通路。

[0067] 定子组件还包括将护铁部件 72 固定到位的带翅片的壳体 76、以及将带翅片的壳体 76 固定到中央柱 70 上的连接件 78。位于孔 79 中的多个螺钉将带翅片的壳体 76 连接到连接件 78 上。带翅片的壳体优选地由具有高导热性的材料制成,诸如铝,这有助于从护铁部件 72 和线圈 64a-64c 去除热量。可将气流引导越过翅片来帮助从致动器 60 去除热量。

[0068] 如图 4C-4D 所示,相邻护铁部件 72 由三个弧形部分,例如 74a-74c 制成,有利于打断主导涡电流并且因此减少动态损失。在该实施例中,中央柱 70 和护铁部件 72 由粉末金属软磁性合成物(SMC)材料(诸如由总部在 West Lebanon, NH 的 Mii Technologies, LLC 生产的 SM2 或者 SM3,或者由总部在 Hoganäs, Sweden 的 Hoganäs 生产的 Somaloy500)制成。其他实施例可以用具有高透磁性和优选地具有高电阻率的其他材料制成。

[0069] 如图 4E-4F 所示, 衔铁组件 64 包括两个间隔件 83a-82b, 所述间隔件 82b 位于三个径向磁化的磁铁 66a-66c 之间。衔铁组件还包括球窝接头 86, 该球窝接头机械连接气门杆 88 和衔铁组件的其余部分。位于孔 89d 中的一系列螺钉将球窝接头 86 固定到连接件 90 上。一个或者多个夹子, 例如夹子 92 将磁铁 66a-66c 和间隔件 82a-82b 机械固定到连接件 90 上。磁铁 66a-66c 和间隔件 82a-82b 在其径向方向上分裂 83a、83b, 以便打断主导涡电流通路。

[0070] 参见图 4F, 气门杆 88 在固定到球窝接头 86 中的一端包括球 94, 从而气门杆被沿着衔铁组件的纵轴固定, 但在其他方向上自由运动。

[0071] 当将电流施加到线圈上时, 由线圈产生的磁场导致衔铁组件在向上或者向下方向上移动。如图 4H 所示, 当电流在一个方向上流过线圈时, 衔铁组件 66 向下移动, 导致气门杆 88 推动气门 87 到全开位置。类似地, 如图 4G 所示, 当电流反向时, 衔铁组件 66 被向上拖动, 导致气门杆 88 拖动气门抵靠阀座 91, 从而关闭气门。注意在该实施例中, 中央柱没有用作气门杆的引导件。

[0072] 如图 4I 所示, 间隔件 96 位于中央柱 70 中, 用来限制衔铁的偏移范围。在该实施例中, 间隔件 96 是贝氏弹簧垫圈, 但其他实施例可使用弹簧或者弹性体或者聚合体元件来限制衔铁的行进范围。在内燃机上的一个应用中, 限制衔铁的峰值偏移可能是需要的, 从而避免活塞与受致动器控制的气门之间的干涉。

[0073] 通过选择合适的设计参数, 诸如线圈拓扑结构、磁铁和线圈的相对高度和位置关系、护铁部件和中央柱的尺寸和材料、以及线圈材料, 可以获得最大位移、作用力相对于位移的分布和制动力的分布。另外, 致动器的操作可通过施加到线圈上的电流的数量、持续时间和极性加以控制, 从而可以灵活控制气门的操作参数, 诸如气门升程 (即气门的打开量) 和气门正时 (即吸气气门和排气气门相对于曲轴位置的打开和关闭点)。

[0074] 在一个实施例中, 致动器可以采用自下支承 (underhung) 磁铁结构, 其中, 线圈的轴向高度大于磁铁的高度。在利用四个线圈和四个磁铁的一种特定的自下支承磁铁结构中, 每圈线圈由铜制成。每个线圈占据分别由 1.56 英寸内径 ID 和 2.03 英寸外径 OD 以及 0.7 英寸高度所围绕的体积。磁铁高度对磁铁半径之比大约为 3.6 : 1, 且内径为 1.31 英寸、外径为 1.53 英寸, 而高度为 0.4 英寸。每个磁铁由 NdFeB 形成 (尤其是, 由总部在 Edmore, MI 的日立磁性公司制造的 Nd HS35AR) 并具有大约 25g 的质量。

[0075] 在另一实施例中, 致动器可采用自下支承 (underhung) 的磁铁设计, 其中线圈的轴向高度小于磁铁的高度。在一种实现形式中, 致动器使用带有三个铜线圈和三个磁铁的自下支承的磁铁设计。每个线圈的内径和外径分别为 1.48 英寸和 2.28 英寸, 高度为 0.4 英寸。每个磁铁的内径和外径分别为 1.24 英寸和 1.44 英寸, 高度为 0.8 英寸。磁体高度与磁体横截面宽度的比值为 8.1 : 1。每个磁铁由 NdFeB (尤其为由总部在 Edmore, MI 的 HitachiMagnetics Corporation 生产 Nd HS30FR) 制成, 并且具有大约 39 克的质量。

[0076] 用来进行致动器设计的一种途径是画出相对于致动器位移的加速度。该加速度是每单位运动质量的标准化作用力, 定义为静磁力 / 运动质量 (其中在一示例实施例中, 运动质量由磁铁质量加上近似 100 克的寄生质量组成)。在该示例实施例中, 寄生质量指的是任何非力产生运动质量 (即在示例性实施例中不是永磁铁材料的运动质量的任何部分), 诸如气门、磁铁间隔件、连接件、球窝接头组件、传感器等。图 5A 利用 ANSOFT (www.ansoft.

com) 的 Maxwell[®] v. 9. 0. 19 画出了加速度相对于模拟致动器位移的分布, 所述致动器具有如上所述的悬垂 (线 A) 和自下支承 (线 B) 设计。模拟结果显示悬垂设计在距中心的 -0. 15 英寸和 +0. 15 英寸之间的设计偏移范围上具有近似线性的加速度。水平轴代表从气门全关 (-0. 2 英寸) 至气门全开 (0. 2 英寸) 的位置范围。

[0077] 图 5B 示出了对于如上所述示例性悬垂 (线 A) 和自下支承 (线 B) 设计的模拟作用力相对于位移的分布, 也是利用 ANSOFT 的 Maxwell[®] v. 9. 0. 19 软件。对于悬垂设计, 图示的力变化在距中心的 -0. 15 英寸和 +0. 15 英寸之间的预定偏移范围上是基本恒定的, 所述设计偏移范围是行程最大范围的 75%。

[0078] 在设计偏移范围上的力输出和加速度基本恒定是有利的, 其原因在于简化了控制致动器位移和实现可变升程所需的控制策略, 在使用致动器在内燃机中使吸气气门和排气气门致动时尤其有用。

[0079] 再次参见图 2A, 当没有给定子供电时, 从诸如护铁部件 24 和中央柱 28 的定子的铁元件与衔铁组件中的磁铁之间的磁性吸引产生制动力。在一优选实施例中, 致动器构建成当衔铁组件移动到气门全关位置时, 制动力在座合方向作用, 从而帮助将气门 37 (图 2G-2H 中示出) 携带到其气门座上。在该实施例中, 制动力也优选地用来在气门座合之后保持气门关闭。通过使用该制动力作为偏置力, 控制系统优选地不需要向线圈施加电流来保持气门关闭, 这在四冲程内燃汽车发动机中近似为周期时间的 2/3。

[0080] 图 5C 比较了前述自下支承 (线 B) 和悬垂 (线 A) 磁铁设计的制动力特性。自下支承磁铁设计展现了在行程极限端 (即 -0. 2 英寸和 -0. 15 英寸之间和 +0. 15 英寸和 +0. 2 英寸之间) 处更显著的制动力, 这有助于在行程的一个端部处的力输出。悬垂磁铁设计展现出相同的制动力趋势, 但在设计偏移范围上具有更大的制动力基本为零的区域。致动器的磁制动力分布也取决于对各种参数的选择, 所述参数诸如线圈材料、线圈体积、磁铁材料、磁铁体积、护铁材料和结构以及中央柱材料和结构。

[0081] 参见图 6, 用于控制内燃汽车发动机中的多个吸入和排气气门致动器的控制系统 506 包括上游控制处理器 500、以及一系列下游控制处理器 501-503, 所述下游控制处理器各用于一特定的吸气气门或者排气气门。

[0082] 上游控制处理器 500 接收曲轴位置信息 505 (该信息可从光学编码器或者其他跟踪曲轴位置的器件供送) 和来自诸如电发动机控制单元 (ECU) 504 的中央控制器的控制指令。上游处理器使用这一接收到的信息来产生并传递给下游处理器 501-1, 501-2... 501-N 信号, 所述信号是对应于每个受控气门的气门定时 (即吸气气门和排气气门相对于曲轴位置的开关点) 和气门升程 (即气门的打开量)。

[0083] 如在 David Hanson、Jun Ma、Benjamin G. K. Peterson、Geoffrey Coolidge Chick 的与本申请同时提交的名称为 “Controlled Starting and Braking of an Internal Combustion Engine (内燃机受控启动和停机)” 的专利申请中更完整描述的那样, 对应于具体操作模式 (例如在上述对比申请中描述的自启动或者内燃机停机模式) 气门定时和气门升程参数可通过闭合形式计算 (closed-form calculation) 动态确定。可选地, 气门参数可以通过使用查询表来静态确定, 其中, 对应于不同操作模式的预先计算的气门定时和气门升程参数已经被存储在存储器中。在静态实施例中, 上游处理器 500 基于从 ECU 504 接收

的指令把对应于不同操作模式的一套预先计算的查询表搜索一遍。

[0084] 下游控制处理器 501 从上游处理器接收气门控制信号,该控制信号可以是多种形式,例如数字脉冲。响应于从上游处理器接收的气门控制信号,下游控制处理器向电压受控脉宽调制 (PWM) 功率模块 502 发出电压信号来产生一定数量和极性的输出驱动电流。PWM 功率模块 502 然后将电流信号供送给气门致动器 503 的线圈。所施加电流的数量和极性确定了吸入或排气气门致动器 503 的开关动作。下游控制处理器 (例如气门致动器 503-1 的 501-1) 控制和接收关于气门的一个或者多个操作状态的信息 (即加速度、速度和 / 或位置),并且基于当前气门状态信息来调整提供给 PWM 的控制信号。

[0085] 气门状态可经由安装在气门和 / 或致动器上的一个或者多个传感器被监测到。例如,可通过诸如光学编码器的位置传感器来确定气门致动器速度 (V) 和位移 (升程 L)。传感器可直接测量速度或者位移,并且利用微分器或者积分器根据需要来确定其他量,从而计算该其他量。在所述一个示例中,使用线性速度变换器 (LVT) 来直接测量速度,并且将该变换器安装在衔铁的顶部。可选地,也可使用加速度计。

[0086] 应该明白诸如 500 和 501-1 的处理器是功能模块,这些功能模块位于一个或者物理模块中,并且可以是硬件、软件或者任何硬件和软件的结合的模式,或者是模拟或数字的形式。

[0087] 如所述,下游处理器 (例如 501-1) 通过控制施加到致动器上的电流的大小和极性来控制每个单个气门的动态。由多种方式实现这样的控制策略。图 7 示出了基于反馈控制策略来实现下游处理器 501-1 的功能的一个实施例。

[0088] 如图 7 所示,下游处理器 501-1 可发出电压指令 604 和 605 到 PWM 功率模块,该指令导致 PWM 模块向致动器提供全电流 (正或者负)。输入电压指令 604 和 605 与来自上游控制器的气门正时信号的上升或下降沿同步,该气门定时信号引发气门打开或者关闭。下游处理器也包括速度控制电枢速度的反馈回路 601 (通常再负反馈模式中用来减小电枢的速度)、将气门位置精细调节到所需位置的位置伺服 (位移) 反馈回路 602。下游控制器还包括转换机构 603,该转换机构接收来自上游控制器的气门升程指令以及气门状态信息。转换机构使用该信息以及致动器的制动力分布,从而选择使正或者负全电流指令、速度反馈回路和位置伺服 (位移) 反馈回路有效和无效,从而控制气门的开合。

[0089] 参见图 8,气门位移 (曲线 700) 和相应的相应的电流控制信号 (曲线 702) 作为时间的函数利用图 6-7 中示出的示例控制系统绘出。

[0090] 当下游处理器在时间 $T(0)$ 感测从上游处理器接收的气门控制信号的上升沿,则其通过发出全正电流控制电压指令 703 到 PWM 功率模块 502-1 (在图 8 中以点 (a) 指示) 触发气门致动器打开。当在时间 $T(1)$ 处衔铁到达距离 $D(1)$ 的点处并且速度满足预定等式时,下游处理器的开关机构 603 转换以引入负速度反馈信号 705 (并且使正全电流指令无效),该负速度反馈信号引入相反极性的控制电流信号来使衔铁降速。气门速度 $V(1)$ (在负速度反馈生效之间的时间 $T(1)$) 与停止距离 (限定为时间 $T(1)$ 处的阀升程 $D(1)$ 和在时间 $T(3)$ 处的所需位移位置 $D(3)$ 之间的位移差) 之间的预定等式关系可近似以线性关系表示 (忽略诸如燃机腔室压力的因素)。基于 $V(1)$ 、 $D(1)$ 、 $D(3)$ 和该线性关系,负速度反馈回路 601 可以被选择生效并且经由转换机构 603 进行及时控制,从而在时间 $T(2)$ 停止气门。

[0091] 理想地,点 (c) 将与点 (d) 匹配。即,在时间 $T(2)$,气门将准确停止在所需位置。

但是,在实际应用中,物理设备随时间变化,气门动态受到与气缸吸排相关的扰动的影响。作为扰动的结果,当所施加的控制电流的量(利用负速度反馈回路)减小到零衔铁可能减速以在位置(c)停止,该位置靠近所需的位置(d),但不是准确的位于位置(d)。伺服位移回路 602 然后被转换机构 603 选择生效来替换速度反馈回路。位置伺服控制产生用于精细调节气门位置的电流信号,以便在时间 T(3) 准确将气门推动到所需位置。气门将保持其位置,直至接收到气门着陆信号。在示出的实施例中,所需的位移位置是预期的气门升程。应该注意,所预期的位移位置应该小于最大升程(例如 2/3 的作大升程)。D(2) 是在时间 T(2) 处的位移,可以在速度反馈回路无效之后大于或者小于 D(3)(所需位移),在从点(c)到点(d)安定的过程中可能有小的振荡。相应的位置伺服控制电流可以在正值和负值之间振荡。准确的动作取决于位置伺服控制回路的动态。

[0092] 对于气门关闭事件,理想的是避免硬着陆,硬着陆可能缩短气门的寿命并且产生不希望的噪声。优选地获得小于 0.2m/s 的着陆速度。作为衔铁位置函数的制动力分布是可通过改变致动器的设计方面来修改的致动器设计参数,并且在构建以一定速度使气门着陆的系统时是需要加以考虑的。例如,在图 5B 所示悬垂致动器设计中,致动器构建成制动力在大部分偏移范围过程中为基本零,并且当衔铁关闭到其全开(VFO)或者全关(VFC)位置时开始起作用。当气门(衔铁)关闭到 VFC 位置时,制动力作用以将气门保持在闭合位置。控制电流可正确受控(例如利用速度反馈),从而提供与所述制动力相反的作用力,以便软座合关闭并有助于获得所需的气门着陆速度。

[0093] 再次参见图 8,当气门控制信号的下降沿被下游处理器感测到时,其引发气门致动器在时间 T(4) 关闭。在这点上,转换机构 603 将负电流控制指令 605 与 PWM 功率模块 502-1 相连。输入电压信号 605 与气门定时信号的下降沿同步,导致 PWM 功率模块来给致动器提供负全电流,该负全电流导致衔铁朝向闭合位置移动。当衔铁到达距离和速度在时间 T(5) 满足预定关系时,转换机构 603 使负全电流指令失效,并且连接负速度反馈 601。负速度反馈产生控制电流信号,该控制电流信号反之导致 PWM 功率模块向致动器施加电流,该电流的极性与施加用来使气门朝向闭合位置移动的电流相反。随着所施加控制电流减小到零,衔铁减速以在时间 T(6) 在近似所需位移位置(在该示例中位置(g))停止。此时,与气门打开事件类似,位置伺服控制(在时间 T(7))生效来产生用于精细调节气门位置的电流信号,以便尝试准确在所需位置(i)使气门着陆。但与气门打开事件不同,用于气门关闭的位置伺服控制在气门非常靠近所需位置时(h)失效,在该处制动力开始起作用(例如,对于自下支承设计,当气门在图 5B 中处于 -0.15 位置时)。

[0094] 在该点上,转换开关 603 再次施加速度反馈控制。在制动力的影响下,速度反馈被用来控制气门的的速度。这确保了气门可以以所需的速度着陆。实际着陆速度可通过调整速度反馈回路的参数(例如通过增加常量偏置)来加以控制。负速度反馈回路有助于克服速度的波动,从而保持近似不变的着陆速度,直至气门实际在时间 T(8) 在所需位置(i)着陆。而且,对于示例制动力分布,制动力将保持气门关闭,而一旦气门已经着陆时不施加额外的控制电流,从而进一步节能。应该注意,依赖于制动力分布,制动力可能不足以保持气门关闭。在这种情况下,必须施加额外的电流以保持气门关闭。

[0095] 应该明白,可限定多个不同的运行工况(诸如 a, b, c, d 和 T(0), T(1), T(2), T(3) 等,如图 8 所示),用于更复杂的致动器控制。

[0096] 将利用速度反馈回路来降低气门速度、利用位移回路来精细调节定位、以及利用制动力来节省能量结合起来的其它控制策略也是可能的。通过修改控制器设计和选择,包括使用诸如 PID、相位超前或者相位滞后的不同的控制器结构,可合理满足诸如上升时间、超调、稳态误差和稳定时间的性能指标。诸如非线性动态控制器或者基于机器学习的控制器(例如基于神经网络或者模糊逻辑的控制器)的更复杂的控制器也可以使用。

[0097] 已经描述了本发明的多个实施例。但应该明白,可在不脱离本发明的精神和范围的情况下作出多种修改。例如,致动器不是必须是围绕中心轴在一平面上为圆柱形,而可以是四边形或者不是围绕中心轴的平面对称形状。类似地,致动器的位移不必须在平行于中心轴的方向上是有用的,而是可被转化到其他方向。所示实施例中的部件的具体数目、布置和磁化可以加以修改。另外,根据说明书设计的电磁致动器可在需要线性致动的宽泛的各种应用中使用,而不局限于内燃机气门控制。

[0098] 因此,其他实施例落在下述权利要求的范围内。

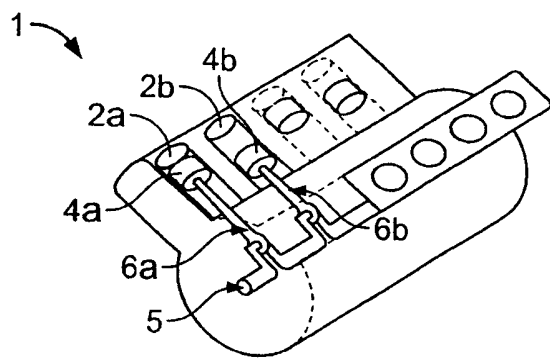


图 1A

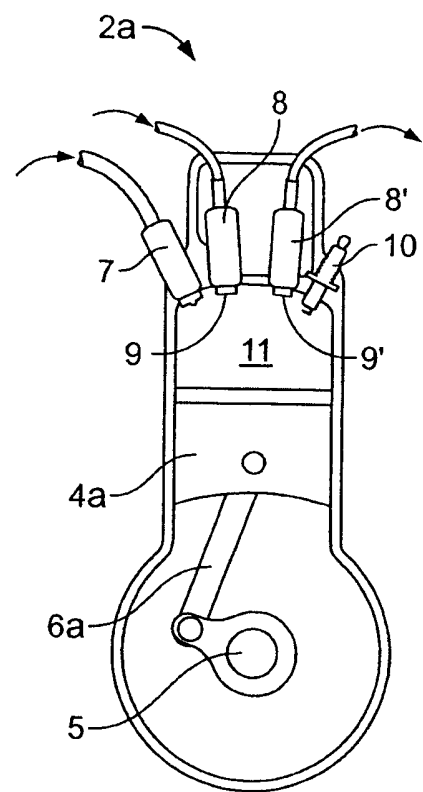


图 1B

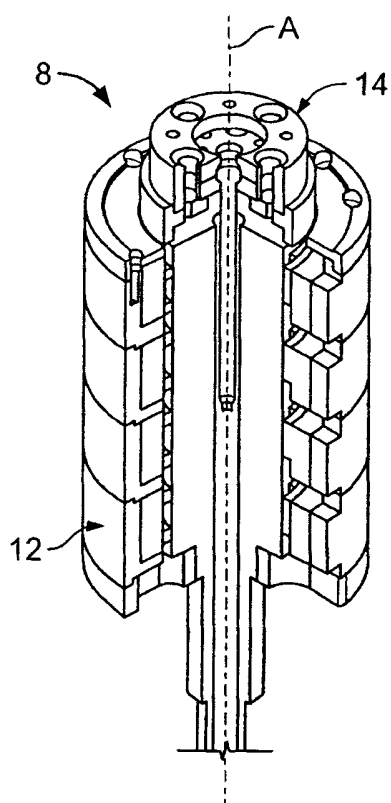


图 2A

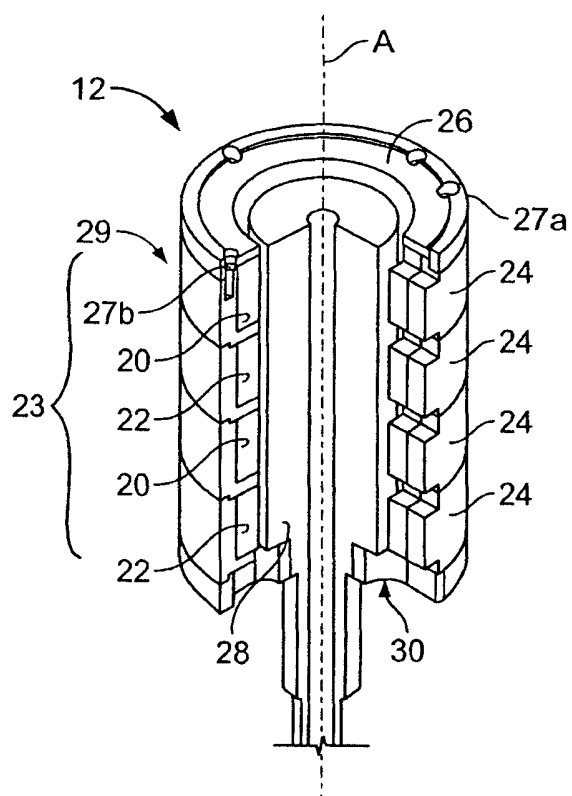


图 2B

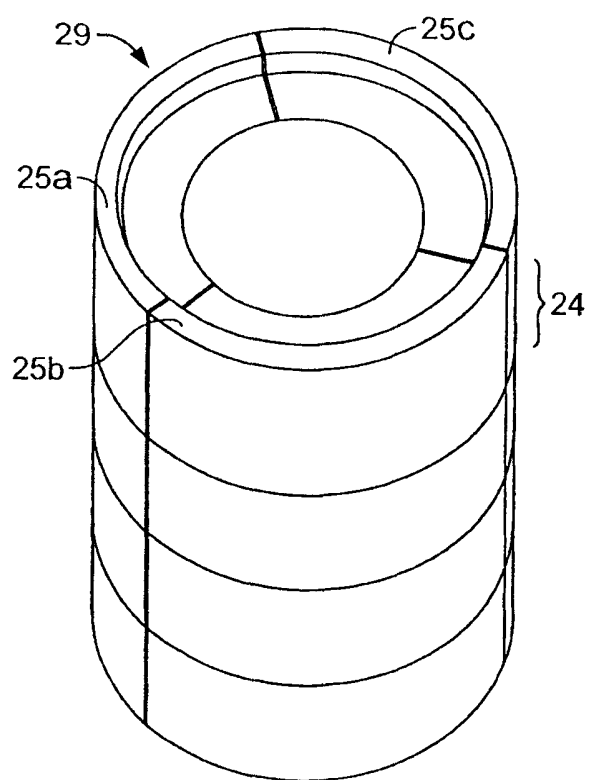


图 2C

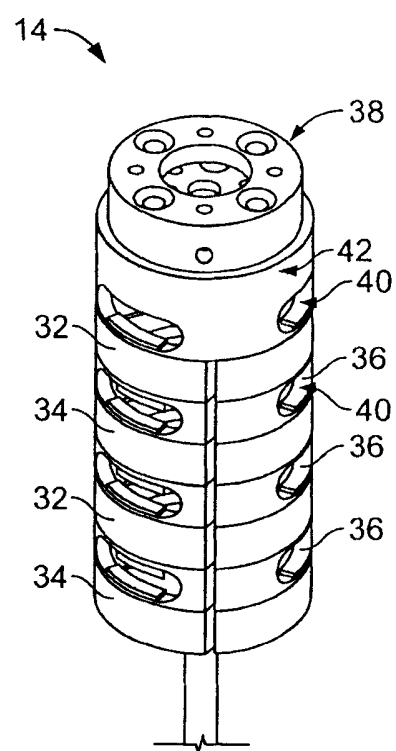


图 2D

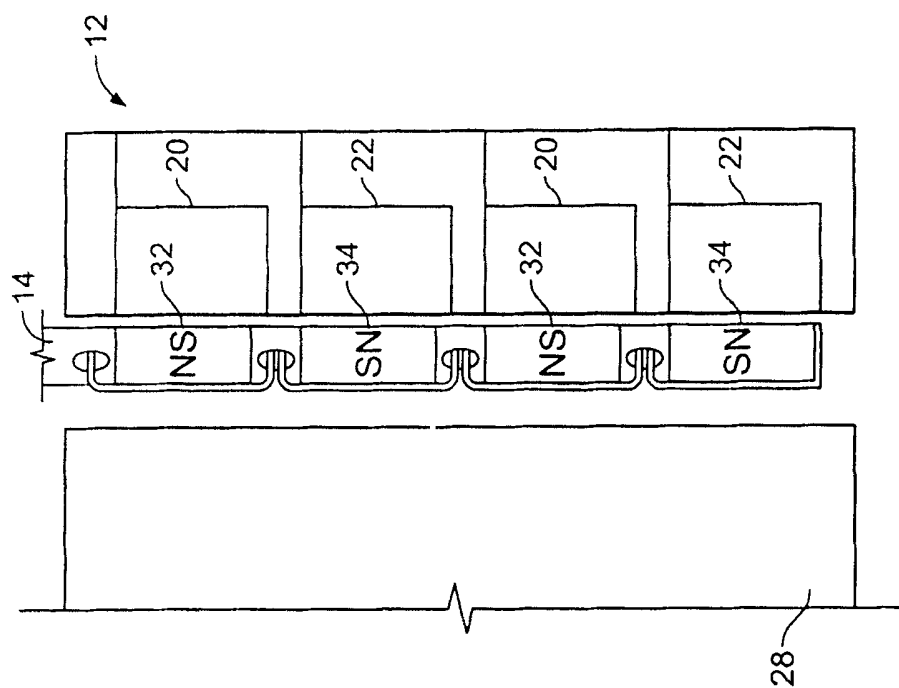


图 2F

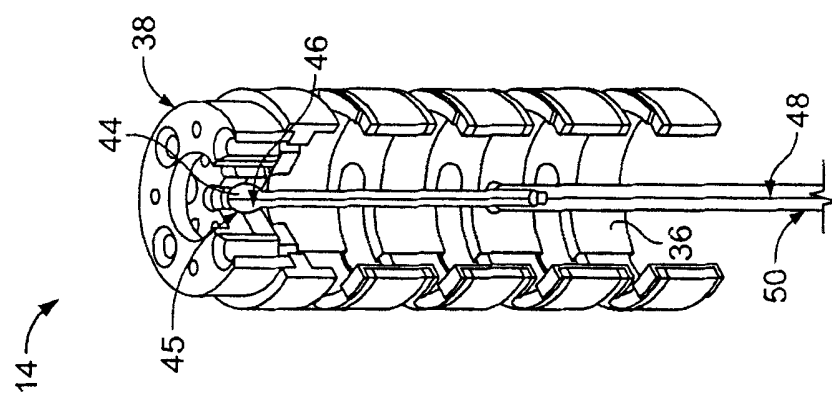


图 2E

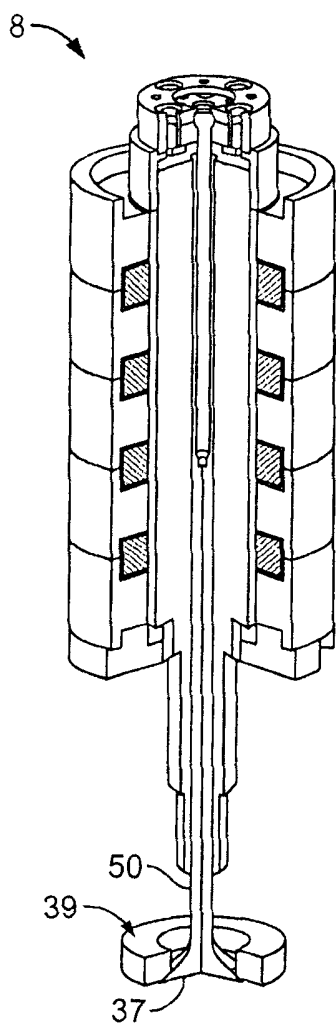


图 2G

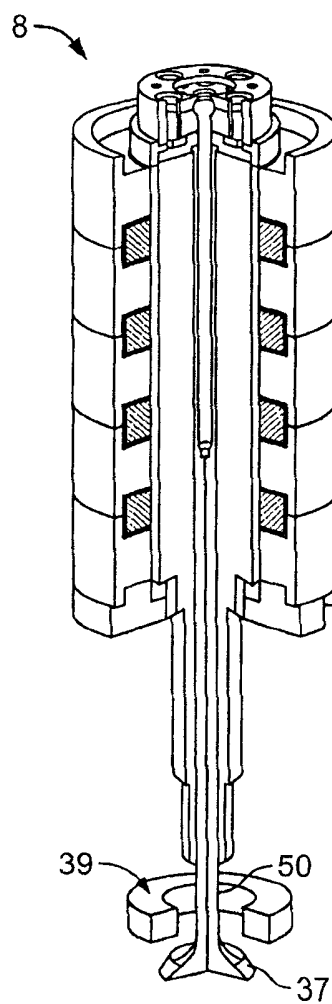


图 2H

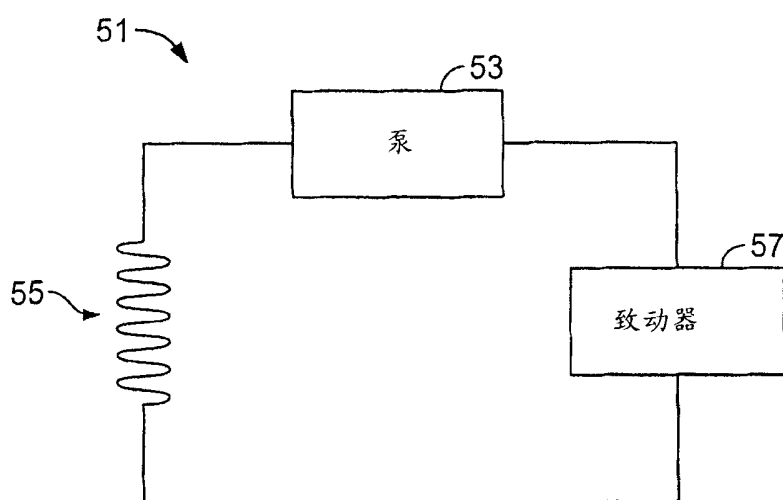


图 3A

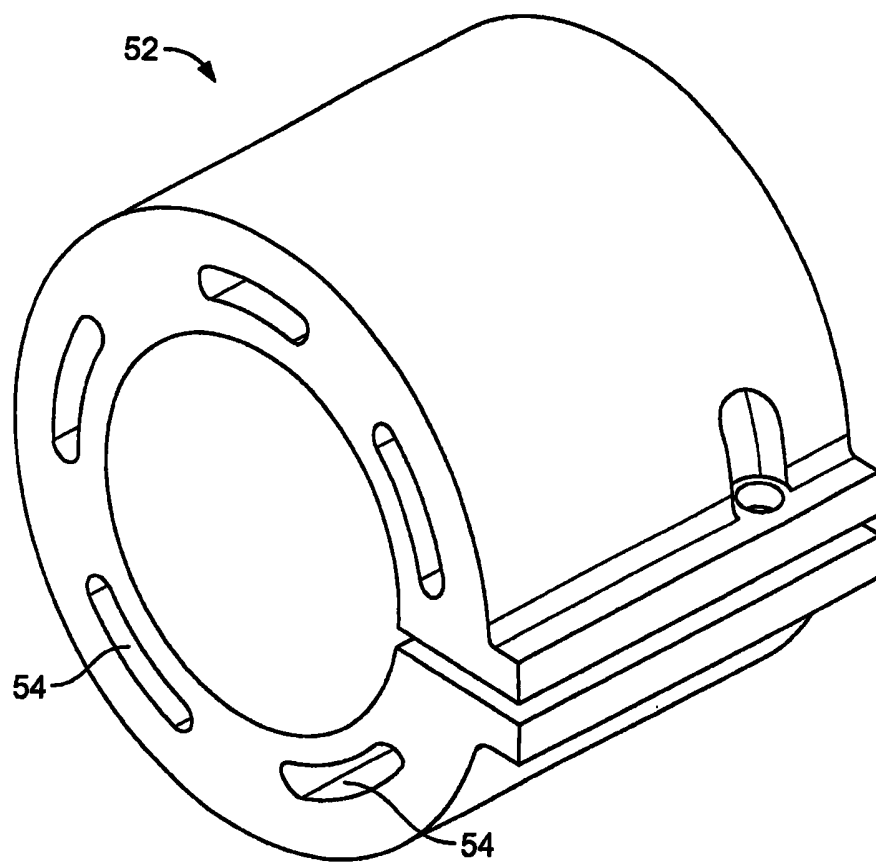


图 3B

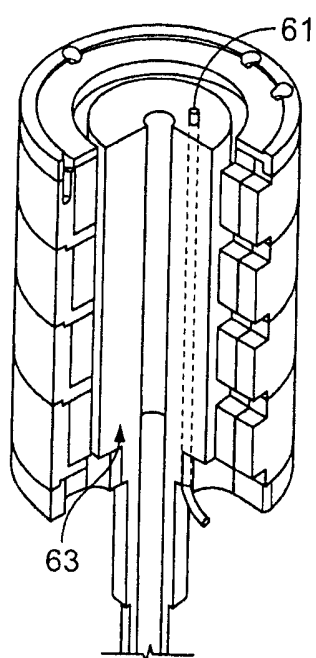


图 3C

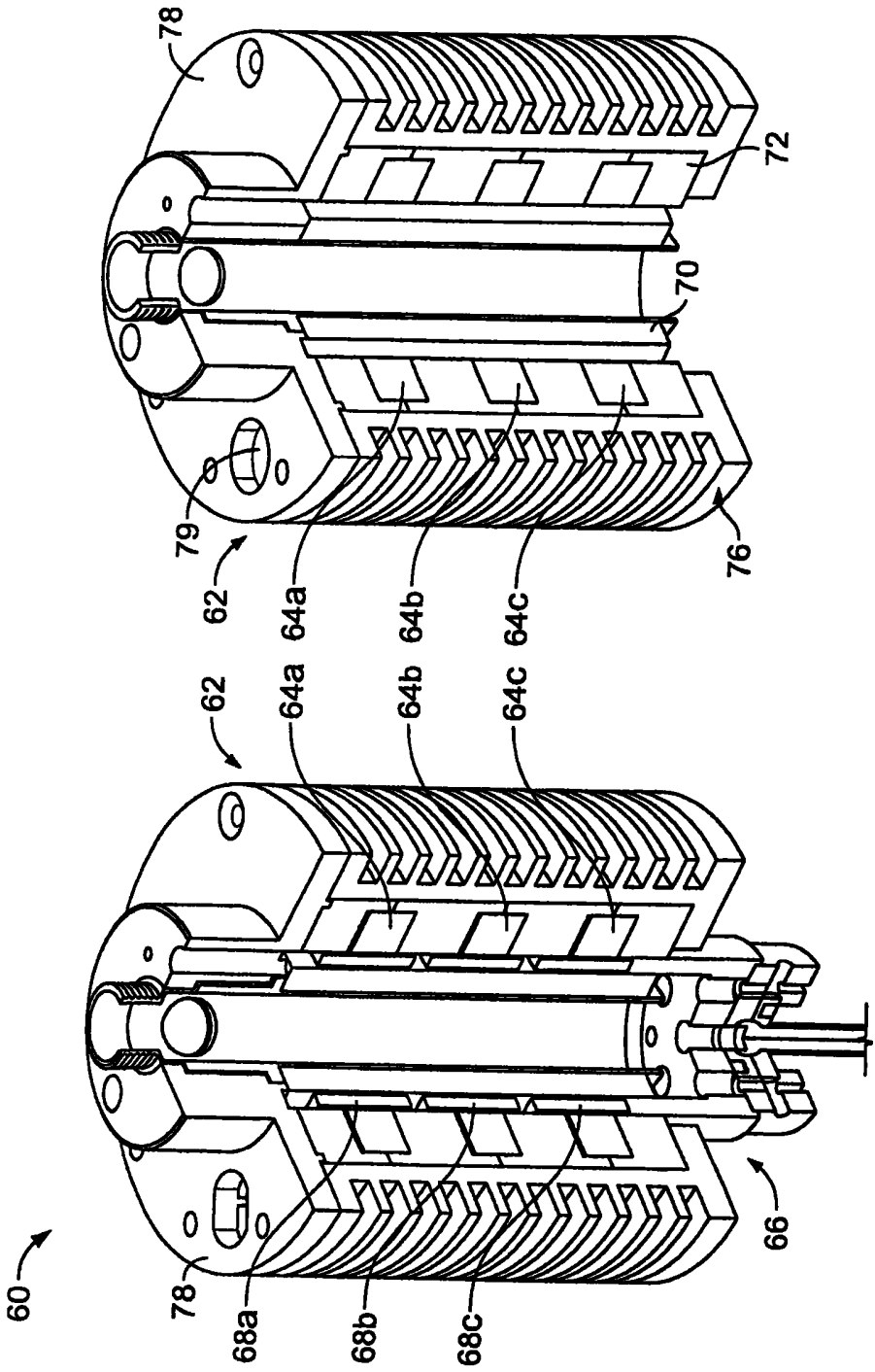


图 4B

图 4A

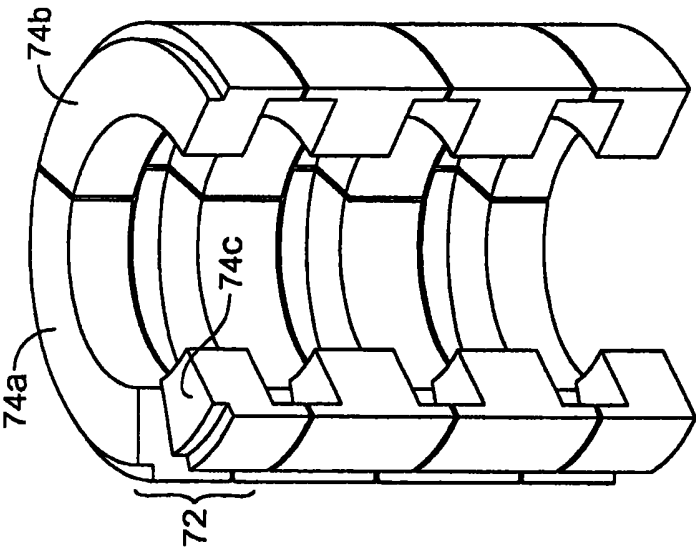


图 4D

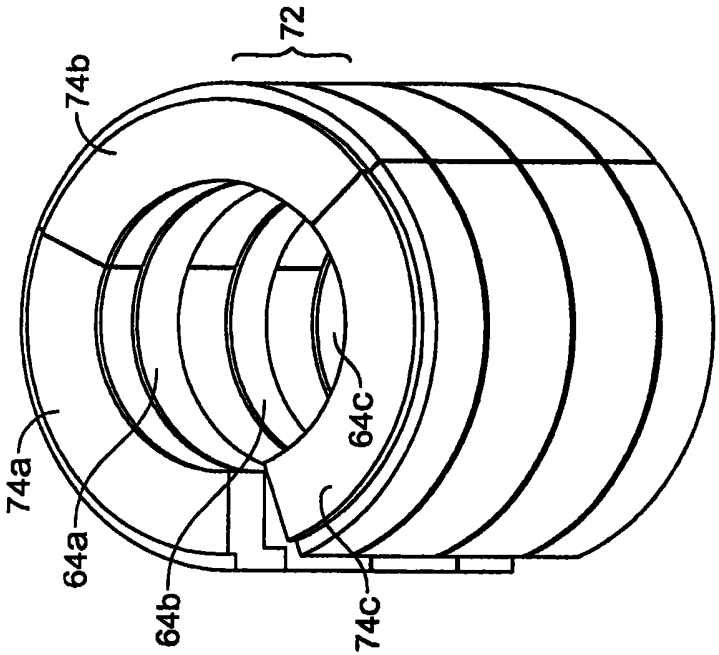


图 4C

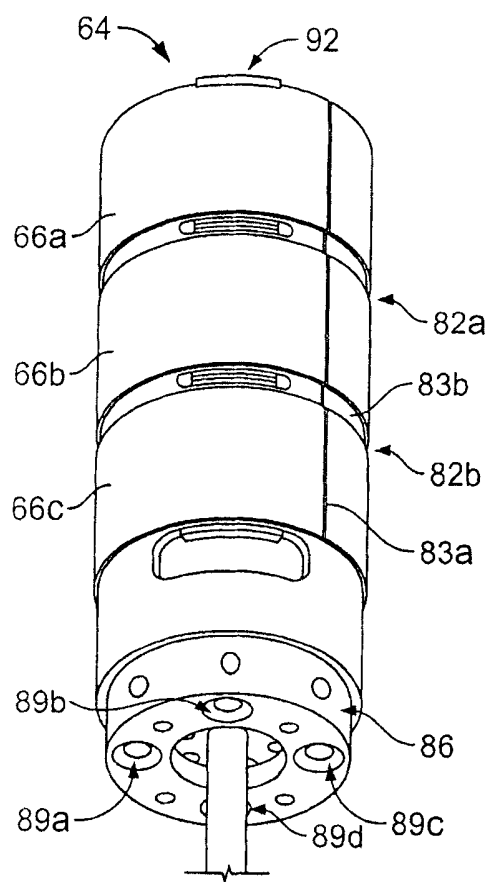


图 4E

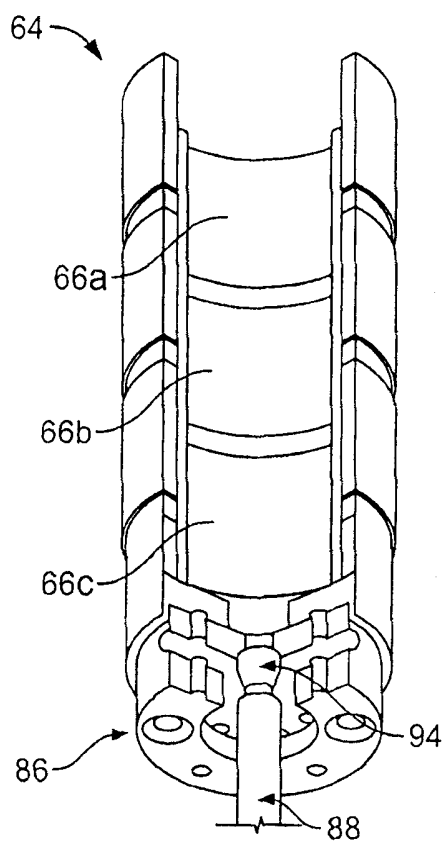


图 4F

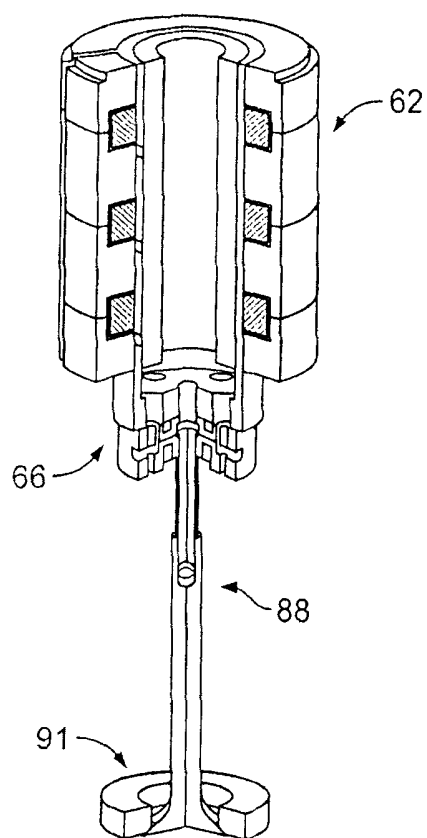


图 4G

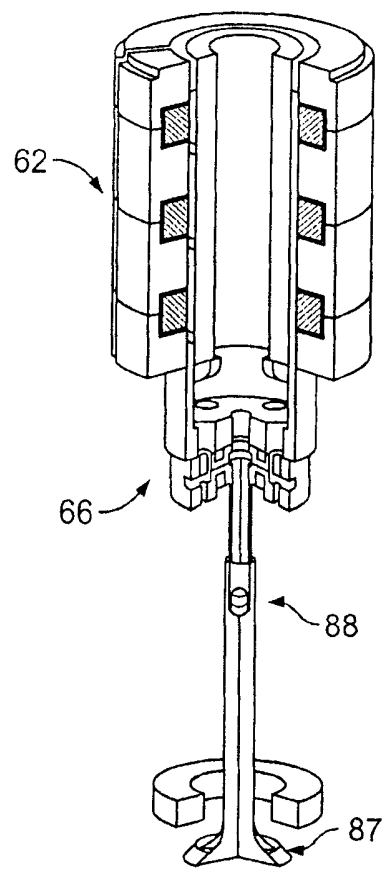


图 4H

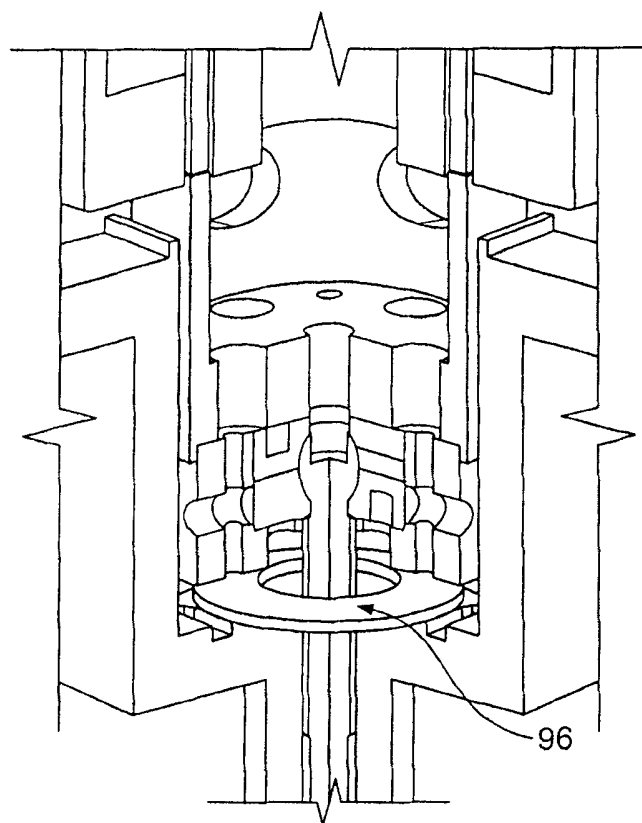


图 4I

悬垂对自下支承磁铁, 加速度与位置的关系曲线

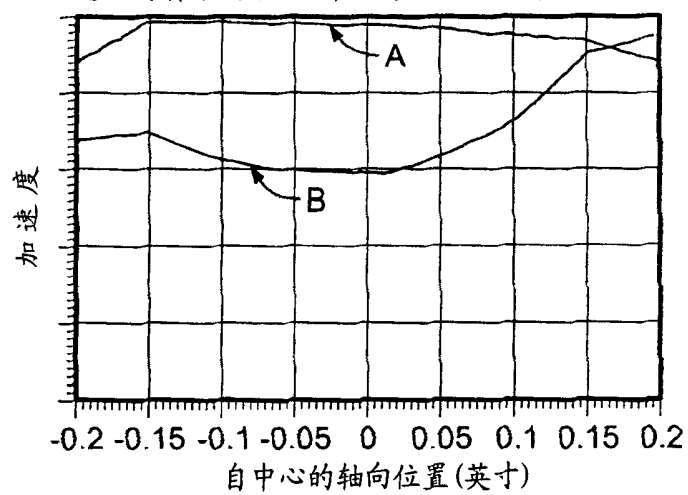


图 5A

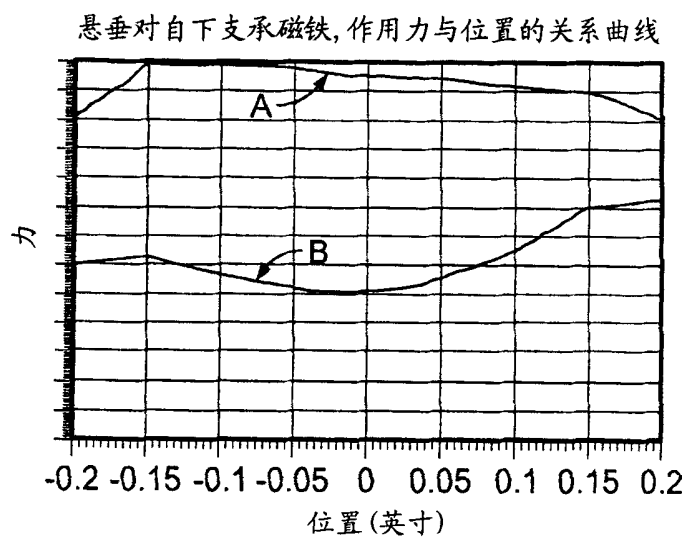


图 5B

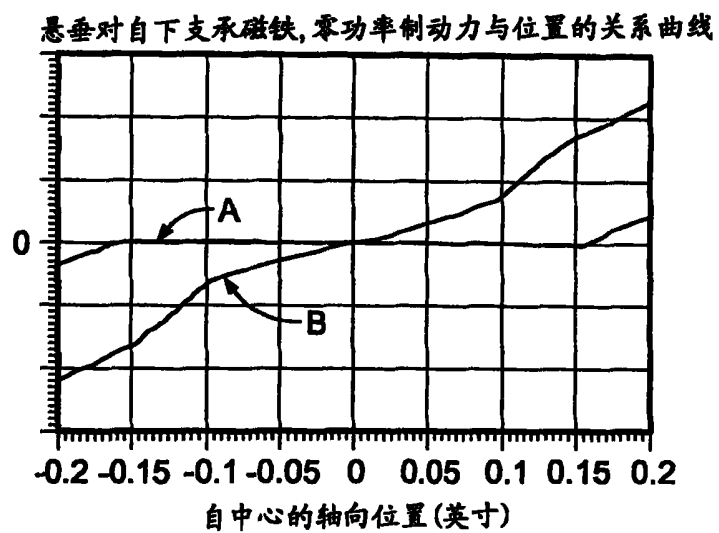


图 5C

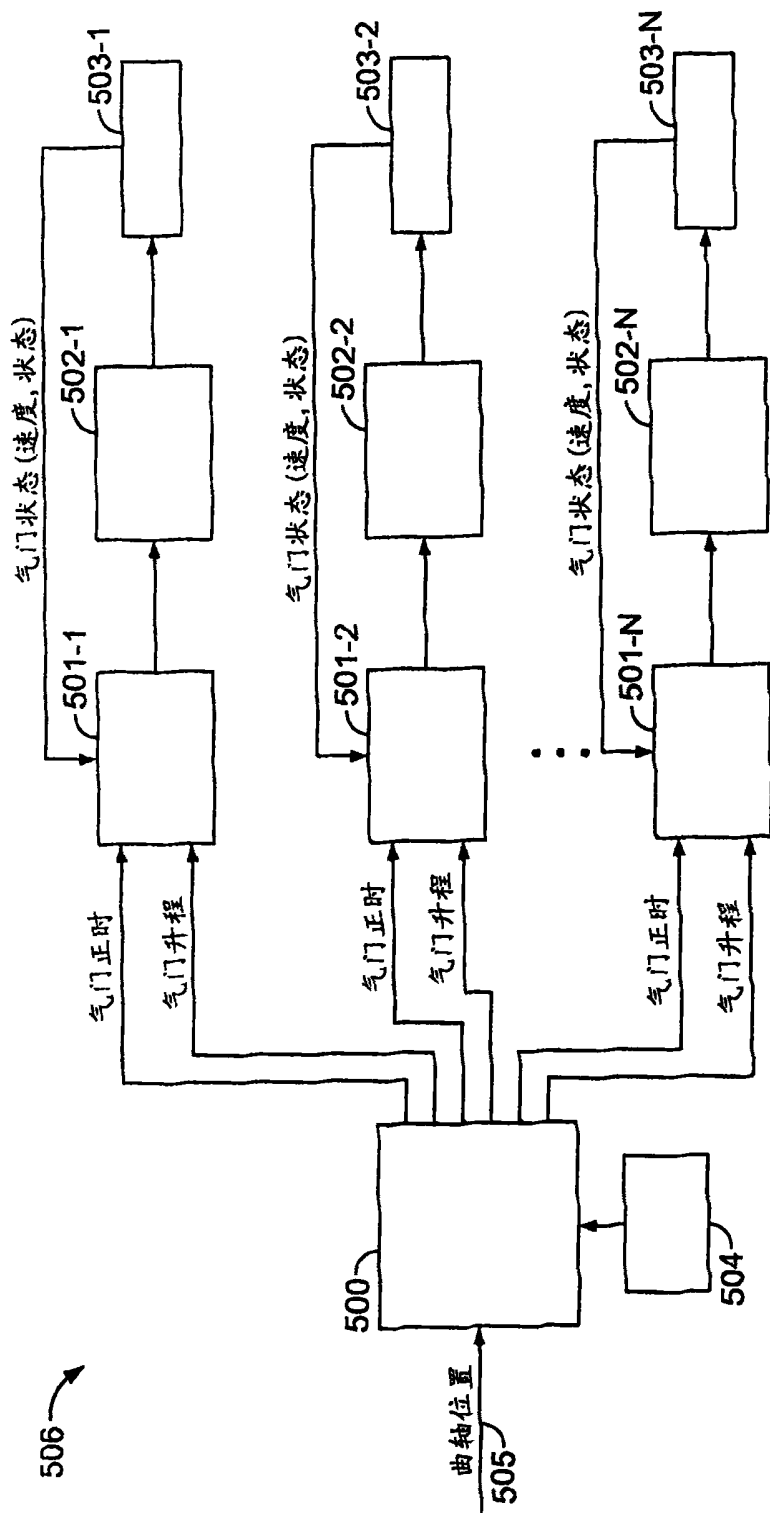


图 6

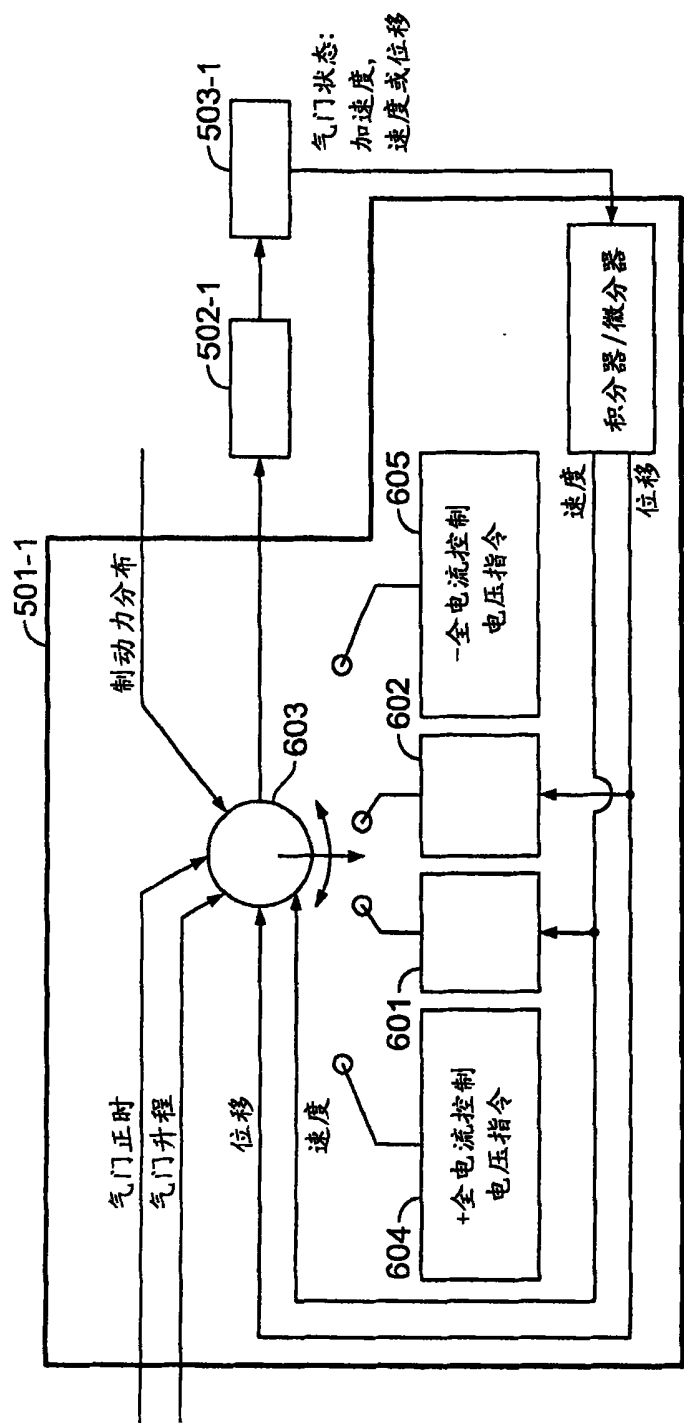


图 7

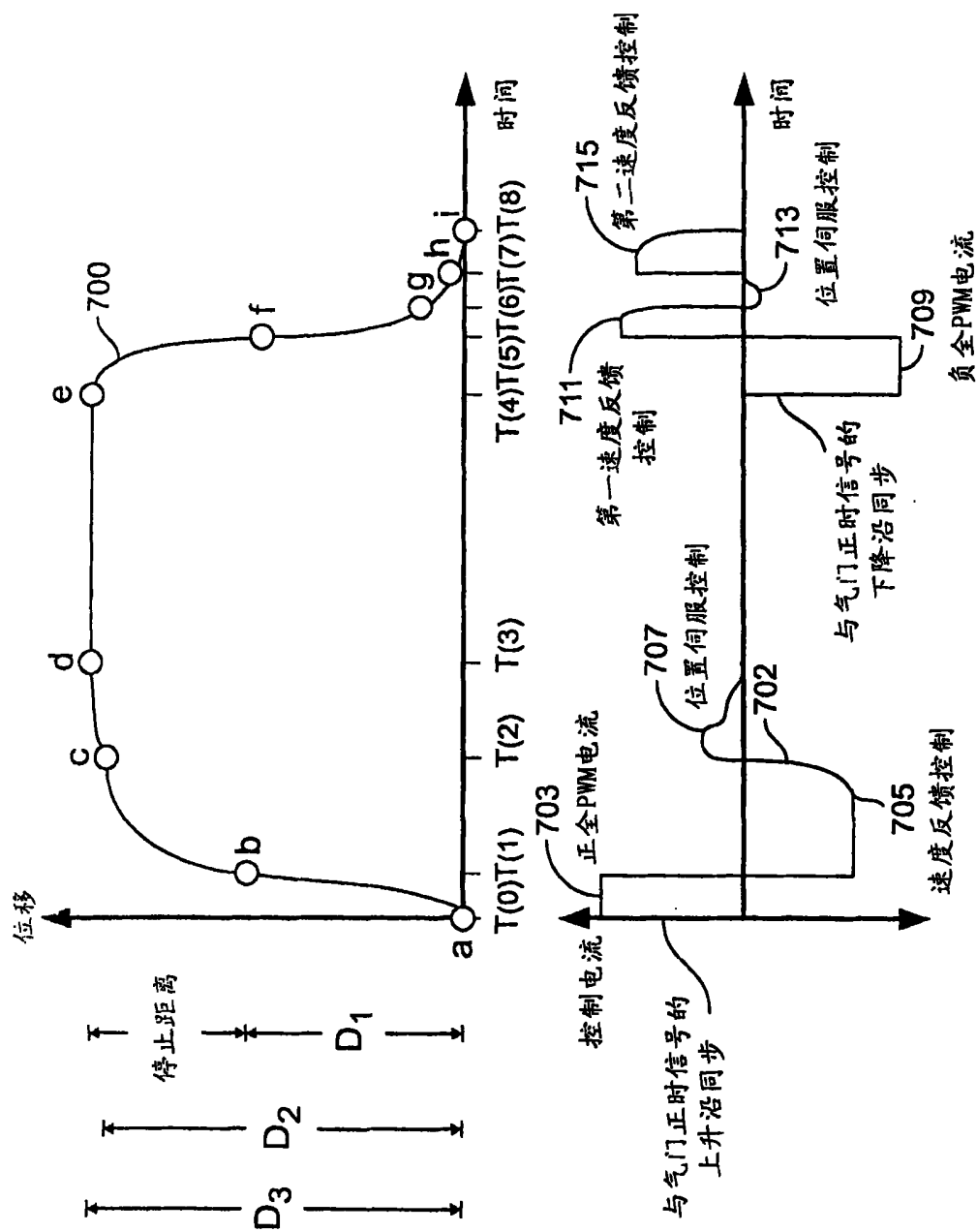


图 8