**基于动态规划算法的并行液压混合总线研究**

**摘要**

本文的目的是开发并行液压混合动力总线制动能量回收的可实施策略。本文基于制动过程分析，建立了制动能量回收的动态规划算法。然后通过典型城市公交车循环中动态规划算法的约束变量轨迹分析并提出制动能量回收的可实施策略。仿真结果表明，在动态规划算法中，蓄能器的制动能量回收效率可以达到60％。液压混合动力系统可以尽可能地输出制动力矩。此外，累加器在可实现的策略和动态规划算法之间具有几乎相同的制动能量回收效率。因此，可实施的策略对于提高制动能量回收的效率非常有效。道路测试显示，液压混合动力公共汽车的燃油经济性比传统的公交车改善了22.6％。

**关键词：**制动能量回收，动态规划，并联液压混合动力总线，换档时间表，泵/电机位移。

**1 绪论**

车辆的大量动能通过汽车制动系统在城市交通循环中消散，而具有频繁停车的传统汽车则占据大部分。例如，如伦敦巴士，日本公交车和纽约市公车，制动能量已经占据66.6％，48.3％和71.1％。然而，混合动力车辆可以恢复这些制动能量并提高能源使用效率。由于液压蓄能器的高功率密度和高能量转换效率，液压混合动力系统（HHS）在加速车辆或回收大量制动能量方面具有比其电机更大的优势。因此，它特别适用于交通繁忙和城市地区的中型、重型车辆。

人们已经对液压车辆（HHV）中的制动能量效率的影响因素进行了许多研究。 Zhang and Chang研究了不同的初始制动压力和积累量对制动能量回收和制动性能的影响。Chen and Vu还分析了液压蓄能器的不同初始压力和液压泵的位移对其制动能量回收效率的影响。然而，这些研究和分析是基于由HHS专门生产的惯性制动过程和制动力来实现的。

Wu等人开发了一种提高液压混合动力中型货车燃油经济性的最佳能量管理算法。孙等人提出了一种用于瞬时控制并联液压混合动力车辆中的能量分布的模糊转矩控制策略。虽然他们提出了一种综合的推进和制动方法来改善典型城市环境中的燃油经济性，但制动特性尚未深入研究。此外，制动力的分配和制动能量回收的效率几乎不被考虑和优化。因此，HHV有必要在典型的城市周期中开发制动能量回收的可实施策略。

本文首先介绍了一种新的HHS配置。然后，本文提出了一种动态规划制动能量回收算法。并通过分析制动过程获得目标函数和约束条件。接着，本文研究了扭矩耦合器齿轮比和泵/电机位移的仿真结果，以获得最大制动功率循环中制动能量回收的可实施策略。然后，本文对可实施的策略进行验证，可以达到动态规划算法几乎相同的制动能量回收效率。最后，我们在道路中测量蓄能器的制动能量回收效率和发动机的燃油经济性。

**2 新HHS配置**

图1介绍了一个新的HHS配置的示意图，该配置由可变液压泵/电机，液压控制阀，蓄能器，加压罐，扭矩耦合器，HHS控制器和相关传感器组成。HHS与常规动力系相平行，从动轮是后轮。可变液压泵/马达通过扭矩联轴器与传动轴连接。制动踏板的位置由角度传感器测量。零摩擦力是通过采用制动踏板和板之间的间隙产生的。

当驾驶员压下制动踏板时，HHS控制器使扭矩耦合器保持适当的齿轮传动，液压控制阀在制动状态下工作，然后泵/马达将液压油从油箱充入蓄能器。当蓄能器达到最大工作压力时，HHS使液压油通过溢流阀溢出到蓄能器中，蓄能器不能恢复制动能量。泵/电机产生的电阻可以使总线减速到完全停止，只有当泵/电机不能提供足够的制动力时才使用摩擦制动器。制动减速和制动能量回收主要由扭矩联轴器和泵/电机决定。在后续启动或加速期间，重新制动的制动能量可以重新用于推进总线。

加压罐可以增加泵/马达的入口压力，使泵/马达的最大转速达到2600r/min，因此泵/马达可以输出更高的功率，扭矩耦合器具有较大的传动比。因此，HHS可以输出更高的转矩，并且累加器可以恢复更多的制动能量。同时，当HHS专门提供电力时，总线具有更好的制动和推进特性。

**3 动态规划算法**

制动能量回收的最佳策略是最大化HHS的制动能量回收。基于制动能量恢复原理，动态规划算法可以很好地解决这个全局最优控制问题。动态规划算法的关键点包括目标函数和制动能量回收的约束条件。

**3.1目的函数**

蓄能器的可恢复制动能量可以表示为

(1)

其中N是驱动循环的总段长度，p(k)和Q(k)是在k制动时间的泵/马达的压力和流量；Δt是时间步长。

由于时间步长Δt可以固定，当HHS可以恢复最大制动能量时，式子(1)应满足

(2)

其中是在k制动时间的泵/马达的功率。

基于Boyle定律，蓄压器的气体压力和体积满足

(3)

其中p0和V0分别是蓄电池的预充压力和体积；V（k-1）是k-1制动时间的蓄能器的气体体积；n是气体多变指数。

由于泵/电机的压力随其流量的增加而变高，(3)意味着这些参数(p(k)，Q(k))具有一致的趋势。因此，(1)在泵/电动机Q(k)的流量最大时具有最大值。基于制动能量回收原理，泵/电机的速度和流量可以表示为

(4)

(5)

其中u(k)和i2g(k)分别是总线速度和扭矩耦合器的传动比；ω(k)，D(k)，ηpv(k)分别是泵/马达的速度，位移和体积效率。因此，泵/电机流量Q（k）是制动能量回收的目标函数。

**3.2约束条件**

当总线的驱动路径固定时，制动速度u(k)不能改变。泵/马达的位移和速度可以确定泵/马达的压力。泵/马达的压力，流量和速度可以确定泵/马达的机械效率和体积效率。因此，泵/马达的位移和扭矩耦合器的传动比是制动能量回收的约束变量。

由于HHS的输出转矩不能超过总线所需的转矩，泵/电机的位移不能超过其额定值，所以HHS的输出转矩和泵/电机的位移必须满足以下条件

(6)

(7)

其中Tp（k）是HHS的输出扭矩；η2g（k）是扭矩耦合器的工作效率；Tr（k）是总线所需的转矩，在最终传动和转矩耦合器之间定义；Dmax是泵/马达的额定值。方程(6)和(7)是泵/马达的位移的约束条件。

**4 实施策略**

应制定制动能量回收的动态规划算法，以实现其可实施的策略。动态规划算法的约束变量是泵/电机的位移和扭矩耦合器的传动比。分析过程仅考虑最大制动功率周期。蓄能器的最小压力和最大压力分别为11和31.5 MPa。制动能量回收可以被认为是绝热的过程，因为CTUBC的每个制动过程都需要不到一分钟的时间。

**4.1扭矩耦合器转换时间表**

4.1.1结果分析

当总线速度超过27km/h时，扭矩耦合器作为小齿轮比的齿轮。因此，扭矩耦合器的换档顺序可以如下结论：

1）当总线速度为27 km/h时，转矩联轴器的传动比i2g = 3.9468；

2）当总线速度u > 27 km/h时，转矩联轴器的传动比i2g = 1.776。

4.1.2讨论和验证

根据制动能量回收原理，转矩调速器应具有两个变速调度表：第一个换档时间表如第4.1.1节所示。第二个换档计划是扭矩耦合器在小齿轮比整体制动过程中保持工作。当总线速度大于27km/h时，由于转矩耦合器保持较小的传动比并且蓄能器具有相等的初始压力，所以HHS输出在两个换档计划中相等。输出转矩不能满足母线所需的转矩。当总线速度小于27 km/h时，转矩联轴器在第一个变速档中保持较大的档位比。并且输出转矩可以满足总线所需的转矩。然而，扭矩耦合器在第二换档时保持小齿轮比，HHS不能满足总线所需的扭矩。

摩擦制动系统中的大部分制动能量都可能被浪费。然而，当总线速度小于27km/h时，由于HHS可以在第一个换档计划中提供更大的制动力矩，所以在第一个换档时间表中，累加器可以恢复更多的制动能量。此外，如果HHS专门制动总线，那么在第一个换档程序中，总线制动距离更短。

**4.2泵/马达位移策略**

基于制动能量回收原理，可实现的策略可以如下建立：当总线速度超过27km/h时，泵/电机工作在最大位移，扭矩耦合器作为小齿轮工作齿轮比。当总线速度不超过27km/h时，泵/电机的位移可以变化，以满足总线所需的扭矩，扭矩耦合器与大齿轮比的齿轮一起工作。

我们在动态规划算法和可实施策略之间比较了泵/马达位移的仿真结果。泵/电机的位移在动态规划算法中逐渐增加到125ml/r，当总线速度超过27km/h时，在实施策略中将值保持在125ml/r。扭矩耦合器作为齿轮传动比小的齿轮。我们知道了动态规划算法中HHS的输出转矩大于实施策略中的输出转矩。此外，两种策略中HHS的输出转矩不能满足总线所需的转矩。

当总线速度不超过27km/h时，扭矩耦合器作为大齿轮比齿轮工作。另外，两个策略中HHS的输出转矩相等，可以满足母线所需的转矩。随着蓄能器的压力变高，两个策略中泵/马达的位移逐渐减小。此外，动态规划算法中的泵/马达的位移量也小于可实施的策略。

根据比较可知，制动能量的损失和不可恢复的制动能量在动态规划算法与可实施的策略之间几乎相同。因此，在两种策略中，蓄能器具有几乎相同的制动能量回收效率。

**5 结果与讨论**

**5.1制动力矩分析**

为了获得足够的液压能量来优化发动机燃油经济性，发动机在发动总线之前为发动机充满压力。水平划线表示总线速度为27 km／h。大多数制动循环结束时的压力，这意味着可再充电的制动能量已被充分利用。如果初始制动速度非常高，当制动过程结束时，蓄能器可以达到满压；如果初始制动速度低，当制动过程结束时，蓄能器不能达到满压。因此，在发车之前，发动机应向蓄能器充满压力。从水平划线27km/h的交叉点观测到，HHS可以在每次公共汽车发射时从静止状态推进到27km/h。HHS可以提供大部分制动扭矩。当所需扭矩小时，HHS可以专门制动总线，并覆盖所有制动能量。当需要高扭矩时，如果HHS不能仅满足要求的扭矩，泵/马达将以最大位移工作。当制动速度小于27 km/h时，HHP可以满足要求的扭矩，并恢复所有的制动能量。

**5.2制动能量回收效率**

需要分析制动能量的回收效率，以便比较DPU算法和CTUBC中的可实施策略。 仿真结果表明，CTUBC的总制动能为12656kJ。

与最大制动动力循环相比，CTUBC中不可恢复的制动能量百分比大大降低。不可恢复的制动能量百分比最高，因为在最大制动功率循环中总线的要求转矩最大。在CTUBC的另一个制动周期中，不可恢复的制动能量百分比逐渐下降。在许多制动循环中，累加器可以恢复所有的制动能量。因此，与最大制动功率周期相比，CTUBC中不可恢复的制动能量百分比大大降低。制动能量的恢复效率随着不可恢复的制动能量的减少百分比而增加。因此，蓄能器的制动能量回收效率可以达到近60％。与蓄能器的制动能量回收效率相比，两种策略的区别只有很小。因此，可实现的策略可以达到DP算法几乎相同的制动能量回收效率。

**6 道路测试**

本工作采用并联液压混合动力总线，当HHS停止工作时，液压混合动力总线成为常规总线。如果工作压力低于11MPa或高于31.5MPa，蓄能器分别停止释放或恢复制动能量。蓄压器的压力和流量分别由相应的传感器测量。发动机的燃油消耗由燃油消耗仪测量。驾驶路径是CTUBC。TUBC的测试距离为5898米。

在道路测试中，总体制动能量损失的精确测量是非常困难的，因为无法准确地确定第一驱动器和扭矩耦合器的滚动阻力，风阻和能量损失。然而，压力传感器和流量计可以准确地测量出压力和流量。因此可以获得蓄能器的可恢复制动能量

(8)

随着总线驱动，蓄能器的可恢复制动能量逐渐增加。根据功能(8)的计算，当所有制动过程结束时，蓄能器的可恢复制动能量可达到7076 kJ。因此，通过功能(1)的计算，蓄能器的制动能量回收效率为55.91％。制动能量回收的结果误差为2.13％，显示了模拟和试验之间的比较。误差的主要原因是内部泄漏和热损失。然而，与测试数据相比，仿真结果存在很好的一致性。

发动机的燃油消耗量可以在道路测试中由燃油仪表进行精确测量。随着公共汽车向前发展，发动机的燃料消耗逐渐增加。通过计算，液压混合动力总线和常规公共汽车的燃油消耗量分别为100.7公里，25.73和33.24升。与常规公交车相比，液压混合动力客车的燃油经济性提高了22.6％。因此，由于制动能量回收的可实施策略，液压混合动力总线的燃油经济性大大提高。

**7 总结**

本研究介绍了HHS的制动能量回收原理，然后建立了制动能量回收的DP算法。泵/马达的流量被确定为目标函数，约束条件是扭矩耦合器的齿轮比和泵/马达的位移，分析制动能量的恢复过程。

基于CTUBC最大制动功率循环中动态规划算法的仿真结果分析，提出了制动能量回收的实现策略：当总线速度超过27km/h时，泵/电机工作具有最大位移和扭矩耦合器作为小齿轮比的齿轮。当总线速度不超过27km/h时，泵/电机的位移可以变化，以满足总线的所需扭矩，扭矩耦合器作为大齿轮比的齿轮工作。通过比较两个换档时间表中的输出转矩和制动能量分布来验证这些结果。

模拟结果表明，可实现的制动能量回收策略可以充分利用制动特性，大部分制动转矩可以由CTUBC的泵/电机专门提供。此外，HHS可以在每次公共汽车发射时，将公共汽车从静止状态推进至27km／h，这使得发动机不需要在低燃耗经济区内工作。蓄能器的制动能量回收效率可以达到近60％，说明可实现的策略与DP算法之间只有一点差异。因此，可实施的策略对提高液压混合动力总线制动能量回收的效率非常有效。最后，道路测试验证了可实施策略中制动能量回收效率的仿真结果。液压混合动力总线的燃油经济性比普通公交车高达22.6％。