基于超导材料的地铁进出站能量回收利用装置设计说明书

设计者：王沛，程鸿浩，罗兆祥，王润祥，周艺梵

指导教师：李超，原续波

（天津大学，机械工程学院，天津，300350）

作品内容简介

通过实验设计了一种基于超导材料的地铁进出站能量回收利用的装置。在我国提出2030年实现“碳达峰”，2050年实现“碳中和“的双碳目标下，节能减排越来越成为当今时代发展的重要主题之一。

经过本小组成员的资料搜索与相关调研，发现我国轨道交通，尤其是地铁运营过程中能量消耗巨大且由于地铁通常停靠站点较多，需要频繁刹车及启动，故本小组考虑通过一种新型的装置来辅助地铁刹车系统减少能量损耗。

考虑到材料相关性质问题，该装置需要采用一种寿命长，损耗率低的材料，鉴于高温超导材料所具备的特性，能够一定程度储存地铁刹车时的能量，同时又在地铁列车出站时释放储存的能量，从而达到节能乃至减排的效果。

在提出相关技术设想后，本小组在指导老师的带领下参观了高温超导的实验装置并模拟相关实验，从而对相关材料性质获得进一步的认知。最终，小组成员购买了相关物品，对增加能量回收利用装置的列车进行了实物模拟并进行记录。此装置若能大量运用于我国的地铁系统当中，无疑会一定程度上减少能量消耗，助力双碳目标的实现。

关键词：地铁，超导材料，能量回收，节能减排

联系人：王沛

联系电话：13623673677

EMAIL：1825950798@qq.com

**目 录**

[1 研制背景及意义 2](#_Toc101801011)

[1.1 研制背景 2](#_Toc101801012)

[1.2 现实意义 3](#_Toc101801013)

[2 设计方案 4](#_Toc101801014)

[2.1 系统设计 4](#_Toc101801015)

[2.2 机械部分 4](#_Toc101801016)

[3 理论设计计算 5](#_Toc101801017)

[4 工作原理及性能分析 6](#_Toc101801018)

[4.1 工作原理 6](#_Toc101801019)

[4.2 性能分析 6](#_Toc101801020)

[5 装置特点及应用 7](#_Toc101801021)

[5.1 装置特点 7](#_Toc101801022)

[5.2 应用场景 7](#_Toc101801023)

1 研制背景及意义

1.1 研制背景

据中国城市轨道交通协会，截至2021年12月31日，中国内地累计有50个城市投运城轨线路9192.62公里，其中地铁7253.73公里占比78.9%。2021年当年共计新增城轨交通运营线路长度1222.92公里，新增运营线路39条，其中涉及8种制式，其中地铁占比79.48%。不难看出，中国的轨道交通正处在并将在一段时间内处在快速增长的状态。通过查找资料，不难得出，两个重要因素促成了轨道交通的快速发展。

一方面是城市轨道交通空间资源综合利用的经济效益。城市轨道交通空间资源的综合利用不仅使投资收益增长，同时还增设了大量就业岗位，带来了较高的经济效益和综合价值，带动了周边沿线房地产价值的提升，使广告业、娱乐、商业等行业的经济收益得到了极大的改善。[1]

另一方面是发展轨道交通可有效降低全社会碳排放。轨道交通应用得越多,越能减少地面汽车的使用,从而减少整个社会的碳排放,发展轨道交通对有效降低全社会碳排放量具有很大的促进作用。不仅如此,在轨道交通的设计、施工、运营等阶段,也可以采取绿色建 造的措施,为全社会降低碳排放作出贡献[2]，例如：轨道交通特有的暗挖工法，新型材料的应用，BIM辅助技术设计及施工，地下车辆段的应用等。

1.2 现实意义

从以上两方面，不难看出轨道交通对于我国城市发展的重要性，本次节能减排大赛本组成员从第二方面入手结合超导材料的性质进行能量回收利用装置的研制。截至2019年年底，全国地铁总耗电量高达152.6亿度，在我国日运行车次规模较大的基础上，刹车过程中损失的总量较大，本小组想到优化列车刹车与启动过程从而实现能量损失的减少，结合超导材料的特性，从而研制相关装置以实现节能减排的目标。

2 设计方案

2.1 系统设计

基于超导材料的地铁进出站能量回收利用装置分为外壳，永磁体，超导线圈，保温装置四部分。

外壳为硬质塑料。

超导线圈材质为Bi-2223高温超导带材（该材料宽 厚 ），线圈两端由Sn-Bi合金焊料连接。该线圈为饼状线圈。

保温装置为外壳中注入的冷却液体。

2.2 机械部分

机械部分设计如图1所示，……

设计时考虑的主要问题：

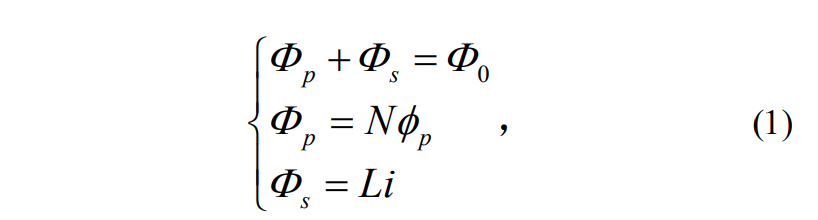
……

3 理论设计计算

针对本装置所使用的超导材料，相关能量转换如下文所示。

超导线圈能够保持其内部磁通量稳定。换言之，超导线圈能够排除外部磁通量并避免任何可能影响其内部磁场的因素。因此，在永磁体移向超导线圈的情况下一些外部磁通量将会被迫进入高温超导线圈。相应的，屏级电流将会被诱导进入到超导线圈中用来抵御与永磁体一同到来的外部磁通量并保持内部磁场为恒定值。

在此我们假定超导线圈时一个理想的没有接头电阻的闭合线圈，高温超导线圈的屏蔽作用可以通过方程式进行描述。

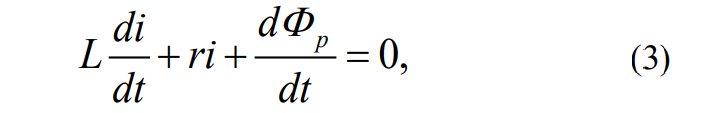


（1）式当中，*Φp*是通过在高温超导线圈中移动永磁体产生的磁通量，*Φs*是在高温超导线圈中由屏级电流产生的磁通量，*Φ0*是高温超导线圈中的初始磁通量，*N*是高温超导线圈的匝数，*Φp*是由永磁体在由超导线圈组成的封闭区域中移动产生的磁通量，*L*是高温超导线圈的感应系数，*i*是高温超导线圈当中的屏极电流。

尽管如此，在实际应用当中，由于接头电阻造成的焦耳热损失，屏极电流i通常会衰减。在这种情况下，各种磁通量的关系式为



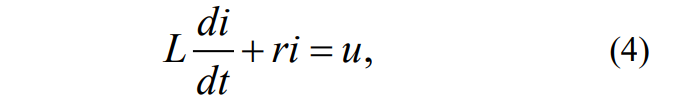
（2）式当中，*Φloss*表示接头电阻造成的磁通量损失。进一步的，我们可以对（2）式求微分得到以下式子



根据（3）式，通过移动在超导线圈中的永磁体产生的磁通量变化率d*Φp*/d*t*可等效为可变电压源，将机械能与电磁能建立联系。图4展示出工作原理中的等效电压源的电压曲线。

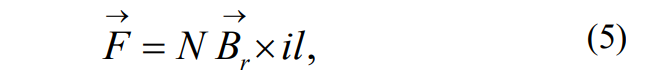
高温超导能量转换器的等效电路与图（5）的ab图中展示出的储放能阶段依次照应。这种等效电路模型不仅能够清晰描述永磁体与高温超导线圈的电磁相互作用，而且说明了整个过程中能量是如何流动的。

储能阶段，永磁体以恒定的速度从位置A移动到位置B（高温超导线圈中心）。因为永磁体的初始位A离高温超导线圈相对较远，因此假定高温超导线圈当中的初始磁通量和电流均为0.在永磁体向高温超导线圈移动时，会形成一种使外部磁通量进入高温超导线圈的趋势从而导致*Φp*的增加。根据方程式（2），*Φs*不得不增加以保持高温超导线圈中总磁通量不变，并且其方向与*Φp*相反。从电路的角度来看，磁通量的变化率以正电压源的形式表现出来，并在高温超导线圈中感应出电流来排除外部磁通量，如方程式（4）所示



高温超导线圈中的感应电流持续上升直至永磁体到达B点，同时电压源的电压值等于0，感应电流达到其最大值*Imax*。

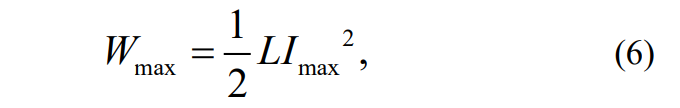
在储能阶段永磁体不得不克服靠近超导线圈带来的电磁力。作用于永磁体上的电磁力F可以用以下公式计算



在公式中，*Br*是永磁同步电机产生的径向分量，l是超导线圈的周长。图2的黑色曲线展示出作用在永磁体上的力在7s前持续上升，这遵循了左手安培定律。

图5（b）呈现的是放电阶段，永磁体以恒定的速度从B（超导线圈中心）移动至C（与位置A关于B对称）。在这个阶段当中，在永磁体逐渐移走的过程中*Φp*逐渐减小。根据方程式（2），*Φs*也随之减少。*Φp*的减小以负电压源的形式表现出来，其方向与超导线圈的感应电流方向相反。因此，负电压源会从电路中吸收能量，从而导致超导线圈中感应电流的减小。尽管感应电流不断减小，它的流向仍未改变而应用于超导线圈的磁场方向变为相反。根据方程式（5），作用在永磁体上的电磁力变为反向，这与图2当中7到14s的黑色曲线相吻合。换言之，反向的电磁力将会持续排斥永磁体直到超导线圈当中的感应电流降为0。

储存在超导线圈中的电磁能表示为方程式（6）。



在储能阶段的末尾感应电流达到最大值*Imax*。

4 工作原理及性能分析

4.1 工作原理

将基于超导材料的地铁进出站能量回收利用装置简化为永磁体和高温超导线圈的电磁耦合原理，地铁进出站的过程模拟为永磁铁进出高温超导线圈的过程。在超导状态下，当永磁体穿越超导线圈时，超导线圈由于电磁耦合原理会产生感应电流，根据磁极“同性相斥”的性质，永磁体在宏观上会表现出“来拒去推”的特殊效果。

即永磁体从线圈上部向线圈运动时，受到向上的阻力，同时超导线圈内部产生感应电流；由于超导的零电阻特性，感应电流持续存在；当永磁体穿越线圈向下运动时会受到向下的推力。而这正适用于地铁进出站的过程，在地铁进站时，阻力使得地铁停下，超导线圈由于感应电流的持续存在而储存能量；在地铁出站时，推力将地铁推出。

4.2 性能分析

演示模型当中，本小组购买了玩具小火车作为地铁模型，以及线圈等材料模拟装置效果。完成制作后，作品实物外形照片见图1-3，并且分别在列车到站停车前，到站停车，启动出站采集了三张图片。

|  |
| --- |
|  |

图 1-到站停车前

|  |
| --- |
|  |

图 2-到站停车

|  |
| --- |
|  |

图 3-启动出站

在将模拟地铁推出后接近线圈时，列车逐渐减速，从能量分析角度可得动能减少，电磁能增加；之后列车缓慢通过线圈，观察到列车明显加速驶离站点，实现电磁能转化为列车动能。若应用于现实地铁系统当中，将能够实现刹车过程中能量的回收利用，减少能量损耗。

5 装置特点及应用

5.1 装置特点

1)高温超导对环境要求较低，保温成本较低；

2）创新性提出将超导材料回收能量用于地铁；

3）装置结构简单，易于制造；

4）使用寿命较长，年均成本较低。

5.2 应用场景

初步设想应用于地铁站的隧道壁上，扩展可应用于相似场景当中。

参考文献

[1] 聂思.城市轨道交通空间资源综合利用的经济效益研究[R].深圳：深圳市实正共盈投资控股有限公司，2021：134-135.

[2] 刘秀枝. 发展轨道交通可有效降低全社会碳排放[N].中国建材报，2022-03-21(3).