

基于永磁涡流的电梯缓冲结构设计

焦培俊

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2023年2月23日; 录用日期: 2023年5月8日; 发布日期: 2023年5月15日

摘要

近年来, 随着城市规划的不断完善, 高层建筑逐渐成为了现代社会的主要生活场所。电梯的使用已经成为高层建筑不可或缺的辅助设施, 而电梯的安全性也成为了社会所关注的重点。针对当前已有电梯缓冲器存在的各种问题及安全隐患, 设计了一种基于涡流场的客用电梯缓冲结构。该装置基于永磁涡流制动技术(PM-ECB)和同性磁极相互排斥原理, 可以解决现有弹簧缓冲器的性能差, 存在风险、液压缓冲器的漏油且其尺寸受高度影响和聚氨酯缓冲器老化不可避免等问题。首先利用Magnet磁场分析软件分析该磁场强度下的缓冲装置是否能承受轿厢重量; 然后, 采用正交试验方法设计比对不同排列布置方案下磁场力的大小, 确定最合适的磁块选择和排列方案。

关键词

电梯, 永磁缓冲器, 永磁涡流制动, 涡流, 设计

Design of Passenger Elevator Buffer Structure Based on Eddy

Peijun Jiao

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Feb. 23rd, 2023; accepted: May 8th, 2023; published: May 15th, 2023

Abstract

In recent years, with the continuous improvement of urban planning, high-rise buildings have gradually become the main living place in modern society. The use of elevator has become an indispensable auxiliary facility in high-rise buildings, and the safety of elevator has also become the focus of social concern. A passenger elevator buffer structure based on eddy current field is designed to solve various problems and safety hazards of the existing elevator buffers. Based on

PM-ECB technology and the principle of mutual repulsion of the same magnetic poles, the device can solve the problems such as poor performance of the existing spring buffer, existing risks, oil leakage of the hydraulic buffer and its size affected by height, and the aging of the polyurethane buffer is inevitable. The magnetic field analysis software Magnet is used to analyze whether the buffer device can bear the weight of the car under the magnetic field intensity. Then, the magnitude of the magnetic field force under different arrangement schemes was compared.

Keywords

Elevator, Permanent Magnet Damper, PM-ECB, Eddy, Design

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着社会经济的高速增长以及人们生活条件和工作要求的提高，电梯已经成为现代社会发展的一种象征，它的制造规模与工作数量已标志着一个国家现代化的程度。为了保证电梯的安全运行，必须设置一些安全装置，这些装置主要有：限速器、安全钳、缓冲器等。若限速器和安全钳及其他保护装置都不作用时，电梯缓冲器是电梯极限位置的最后一道安全保护装置。因此，在正对轿厢的井道底部必须设置一个能吸收大量能量的保护装置，这个装置正是本文重点论述的电梯缓冲器[1]。

市面上现有的电梯缓冲器主要有弹簧缓冲器、液压缓冲器以及聚氨酯缓冲器，都必须在满足上述国家规定标准检验后才可使用，且这类标准比较繁杂，缓冲器中种类结构复杂，检验起来很繁琐，浪费大量人力物力，结果往往也令人不是十分满意。同时上述现有缓冲器均存在一些不足和安全隐患，比如聚氨酯缓冲器，是利用自身塑性变形实现减速，但其老化是不可避免的；弹簧式缓冲器结构虽然简单，但性能较差，缓冲效果不稳定，存在安全隐患；而液压缓冲器对行程的限制比较大，并且可能发生液压油泄露[2]。在这些情况下，乘客的安全就面临着威胁，因此，现在需要一种新型的缓冲器来实现更加安全可靠的保障工作。

2. 总体结构设计

该装置总体方案设计如图 1 所示。

该电梯缓冲装置主要由底部缓冲装置、轿厢两部分组成。电动机置于顶端，通过齿轮系传动轴转动。控制面板固定于机架上。轿厢两侧装有铜板及底部有九块磁块。轿厢导轨位于轿厢两侧，导轨通过导轨支架与井道连接。电磁铁及牵引系统位于轿厢上方，通电牵引轿厢至顶端。底部磁装置两侧装有永磁体，底部装有与轿厢底部磁性相同的九块磁块。下落过程中由于涡流原理使轿厢下落时减速，轿厢底部和装置底部的同性磁铁相斥产生阻力，最终悬浮于坑道底部。

在电梯发生意外情况时，轿厢下落过程中，整个缓冲装置的工作过程分为三个阶段。第一阶段，轿厢在上下运行过程中发生突发状况，轿厢自由落体。

第二阶段，下图 2 中显示的永磁缓冲器包含磁体和导体，永磁体分别安装在检查层、车底和井侧壁上，导体铜板安装在轿厢的两侧外壁上。当轿厢下落到两侧永磁体位置时，铜板与永磁体产生涡流场，开始对轿厢减速，并且下降速度越大，制动力越大，直至制动力与轿厢本身重量相同，此时轿厢速

度较低。此装置基于直线型永磁涡流制动技术，当轿厢突然下落时，轿厢的速度持续加快。当经过被放置在底部两侧永磁体时，一般情况下，轿厢坠速较低，此时导体中的涡流场较弱，力较小，缓冲器可以正常工作。意外发生时，永磁装置与轿厢一起坠落，在到达底部之前相互联系。磁导体以高速切割永磁体的磁感线，并使磁导体表面产生涡流。两个磁场相互耦合，产生与运动方向相反的力，产生缓冲作用，迫使轿厢减速[3]。

第三阶段，在涡流场作用下，轿厢速度逐渐降低，直到涡流力与重力平衡，到达底部后，轿厢和井道底部永磁体产生互斥，最终将轿厢悬停在井道底部。由于经过第二阶段的涡流减速，轿厢的坠落速度已经被削弱得较低，因此在底部磁块的作用下能够比较平稳的停下来，并与井道底部不发生碰撞，使得电梯的安全系数以及乘客在轿厢内的体验更好。

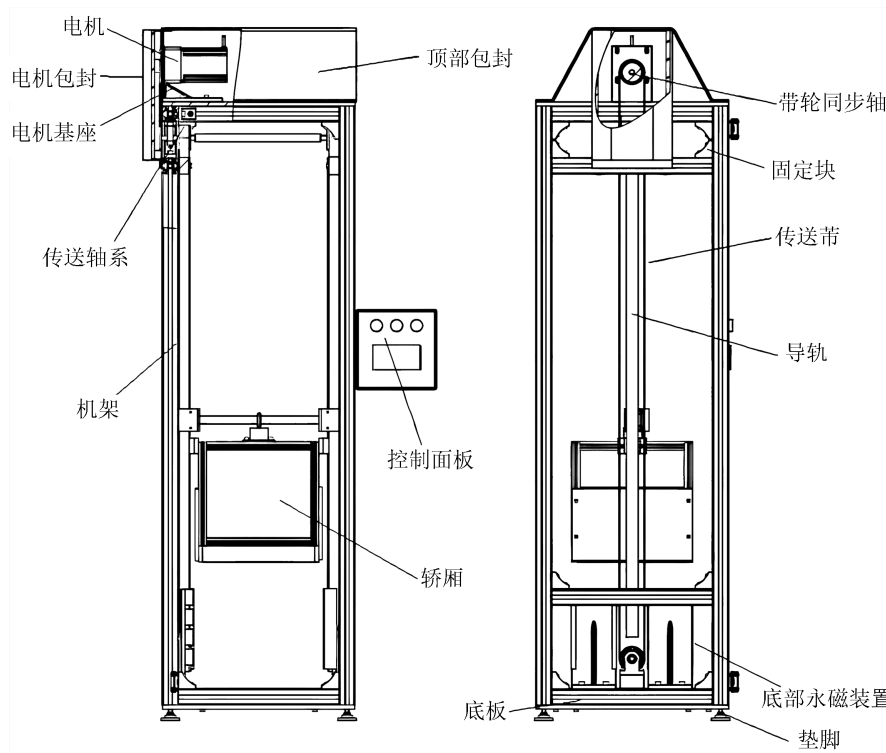


Figure 1. Total design
图 1. 永磁涡流缓冲器整体设计图

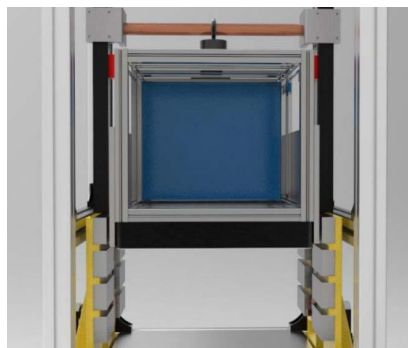


Figure 2. Work presentation
图 2. 工作示意图

3. 侧面磁块结构设计

为使排列磁铁可得到磁力最大值，做法可如下：

- 1) 开路使用，要使之作用距离大的话，同极性相斥密排，磁动势大，磁力线作用距离远；
- 2) 闭路使用，小距离直接吸铁，异性性 N、S 交替相吸排列，此时磁程短，磁阻小，吸力最大；
- 3) 将磁铁摆成捆，同一磁极同一方向，使磁感线同向，保证磁通量最大，故而磁力最大；

由于是闭合回路，磁块布置形式是在运行轨道的制动段两侧(井道底部两侧)布置一系列 N、S 极交替的永磁体，同时在制动对象(轿厢)上与永磁体正对的地方(轿厢两侧)安装导体板[4]。下图 3 为永磁涡流制动技术的结构布置示意图。

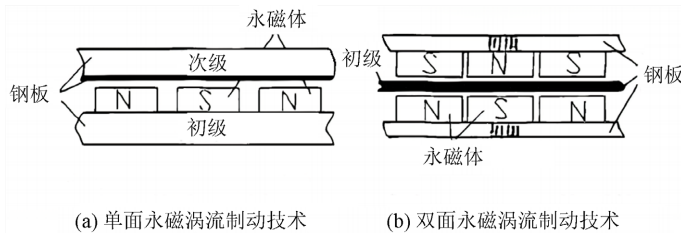


Figure 3. Magnetic block arrangement form
图 3. 磁块布置形式示意图

在轿厢两侧装有铜板，在下降过程中将在表面产生磁涡流，实现轿厢减速。底部两侧装有永磁体，形成闭合回路，当铜板下落到磁场位置，由于楞次定律，产生涡流场。当铜导板在磁场中运动时，切割磁感线，产生电涡流，其方向与轿厢运动方向相反，实现轿厢减速，实现缓冲[5]。

下面来研究一下不同磁块布置形式的方案下的影响，永磁体的布置方式直接影响永磁缓冲器对轿厢缓冲作用的停止时间和距离，通过正交试验设计以下了 4 种不同形式的侧面永磁体的布置方案，如下图 4 所示。它包含(a) 水平各向同性和垂直异养磁场；(b) 水平和垂直为异养磁场；(c) 两块水平各向同性，两块垂直异养磁场；(d) 水平异养和垂直各向同性磁场。此外它包含 4 种类型：(a') 一个磁块；(b') 四个磁块；(c') 若干个磁块；(d') 八个磁块。不同的组合被记录为 a-a, a-b……。

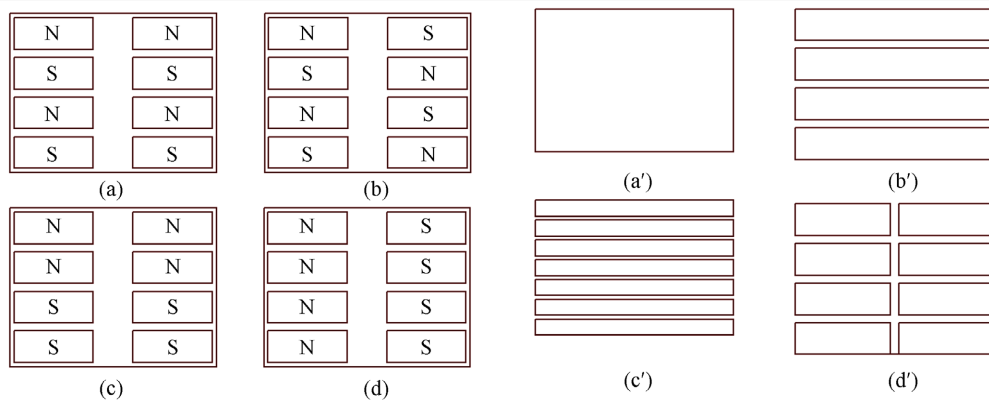


Figure 4. Magnetic block layout and scheme drawing
图 4. 磁块布置形式及方案图

采用 Magnet 对这 16 种不同组合进行分析，下图 5 显示了 16 种不同组合的缓冲时间和缓冲位置距离曲线的变化。从图中可以得出，永磁体和不同组合的导体会随着作用距离的增加而不同程度地增加。最

大值为图 4 中 b 方案，为 1500 N，但不稳定。从整体图可以看出，a-c' 和 b-c' 的整体上升较为平缓，且满足使用要求。考虑到加工和安装成本，采用 b-c 组合最合适，即每个磁体各向同性，多个垂直均匀分布。

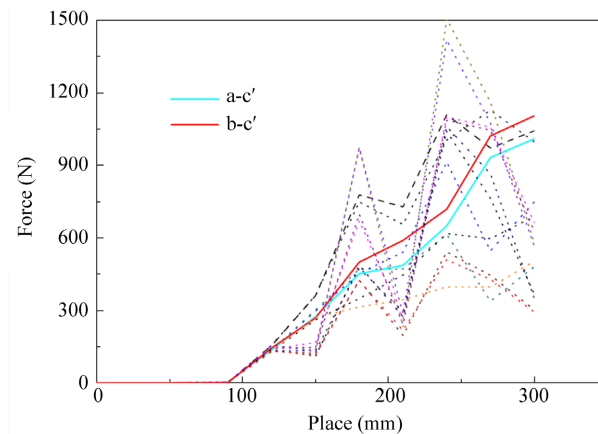


Figure 5. Force in relation to place

图 5. 磁力与位置的关系曲线图

4. 底部悬浮结构设计

永磁弹簧技术，是通过永磁体同级之间的互斥作用来实现与传统弹簧相似的弹簧斥力用它来替代传统弹簧，在结构上它柔性传动，无接触，因此短行程作用力大，能实现比较好的工作效果，此外无磨损、功耗少、使用寿命比较长、噪声小、无需润滑和无需频繁检修等众多优点也是普通弹簧所不具有的，经过结构上合理的设计后，可使它在特征工作点实现优秀的线性力学特征，满足在底部支撑缓冲后低速轿厢的工作要求。

下图 6 为两磁块相互间作用力的变化曲线图，从图中可以看出，永磁弹簧在压缩时其刚度是随变形的增加而增加，且当压缩距离达到一定程度时刚度理论上近似于无穷大。具有这种特性的弹簧与线性关系性特征线弹簧相比，更有利于实现机械方面对短行程减振和快速减振的要求[6]。

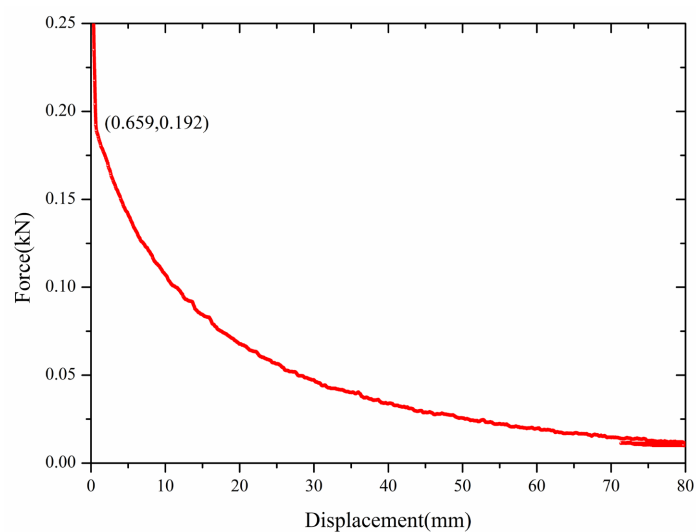


Figure 6. The variation curve of the force between two magnetic blocks

图 6. 两磁块相互间作用力的变化曲线

由上图可以分析，永磁弹簧技术具有以下工作特性：

1) 永磁弹簧的工作特性曲线为典型的渐增型曲线。因此，永磁弹簧特别适合于机械方面对短行程减振和快速减振的要求。

2) 永磁弹簧的特性曲线与磁体的外形尺寸密切相关，改变磁体的外形尺寸可方便地得到各种刚度变化的永磁弹簧。

3) 永磁弹簧当起始距离较短时具有一定的拉伸性能，能承受一定的系统外拉力扰动，使弹簧保持稳定。

为了找出发生最大磁支撑力的磁块布置形式，列出了如下图 7 所示以下 13 种形式的布置方案[7]，模型磁极为 16 极，最大磁体外径 $\phi 133 \text{ mm}$ 。

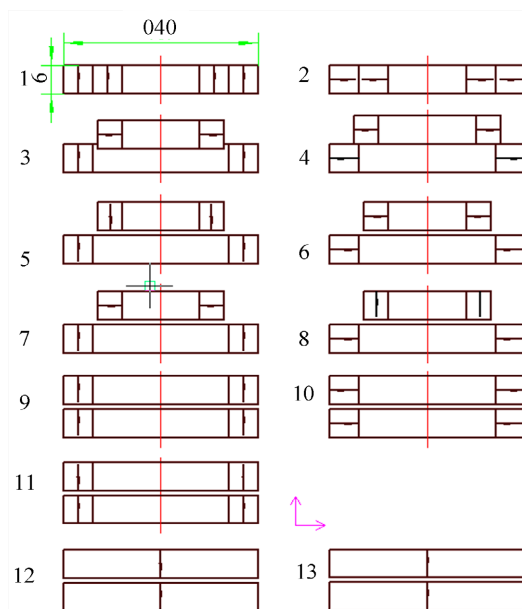


Figure 7. Suspension structure permanent magnet spring layout scheme

图 7. 悬浮结构永磁弹簧布置方案

方案 1 永磁弹簧的上下磁块采用这种内部大磁环套住内部小磁环的结构，内部磁环的外径小于外部磁环的内径，不同之处在于方案 1 的大小磁环的磁极位于上下两侧，方案 2 的磁极位于磁环的内外两侧；方案 3 和 4 的永磁弹簧的上下磁块采用这种上部分为小磁环，下部分为大磁环的结构，不同之处在于方案 3 的上磁环的磁极位于上下两侧，下磁环的磁极位于内外两侧，且下磁环的内径大于上磁环的内径；方案 4 的上、下磁极位于磁环的内外两侧，且下磁环的内径小于上磁环的外径；方案 5 的永磁弹簧的上下磁块采用这种上部分为小磁环，下部分为大磁环的结构，且上磁环的外径都略小于或等于下磁环的内径，上、下磁环的磁极位于上下两侧；方案 6 的上、下磁极位于磁环的内外两侧；方案 7 的上磁环的磁极位于内外两侧，下磁环的磁极位于上下两侧；方案 8 的上磁环的磁极位于上下两侧，下磁环的磁极位于内外两侧。方案 9 的永磁弹簧采用这种上下相同磁环的结构，上、下磁环的磁极位于上下两侧，且上磁环上为 N 极下为 S 极，下磁环上为 S 极下为 N 极；方案 10 的上、下磁极位于磁环的内外两侧；方案 11 的上、下磁环的磁极同样位于上下两侧，不同的是上磁环上为 S 极下为 N 极，下磁环上为 N 极下为 S 极；方案 12 的永磁弹簧采用这种上下相同圆柱磁块的结构，上、下磁块的磁极都位于上下，两侧上磁块磁极上为 N 极下为 S 极，下磁块上为 S 极下为 N 极；方案 13 的磁块的磁极上为 S 极下为 N 极，下磁块

上为 N 极下为 S 极。

在 Magnet 中进行分析模拟计算出最大磁力值。下图 8 为方案 1、2 对比下相互作用力的变化曲线，图 9 为方案 4 相互作用力的变化曲线，图 10 为方案 3、5、6、7、8 对比下相互作用力的变化曲线，图 11 为方案 9、10、11 对比下相互作用力的变化曲线，图 12 为方案 12、13 对比下相互作用力的变化曲线。

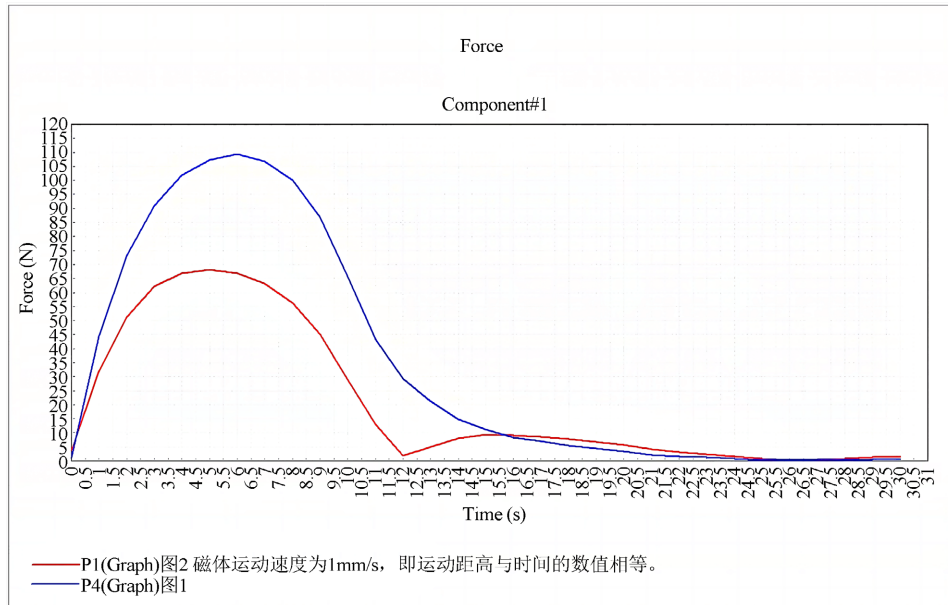


Figure 8. Change curve of scheme 1 and scheme 2
图 8. 方案 1、2 相互间作用力的变化曲线

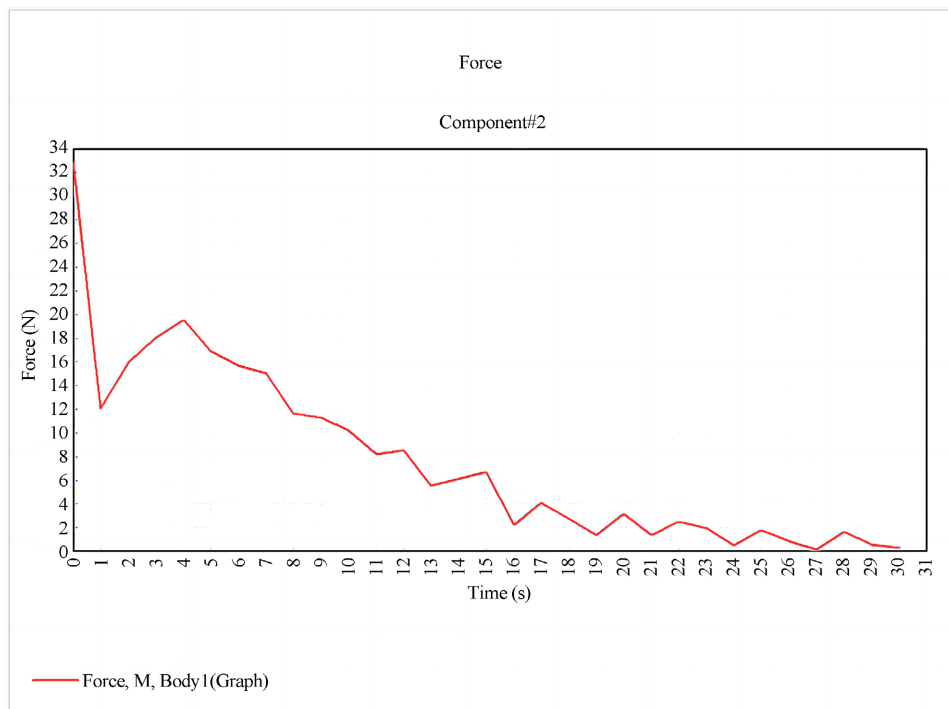


Figure 9. Change curve of scheme 4
图 9. 方案 4 相互间作用力的变化曲线

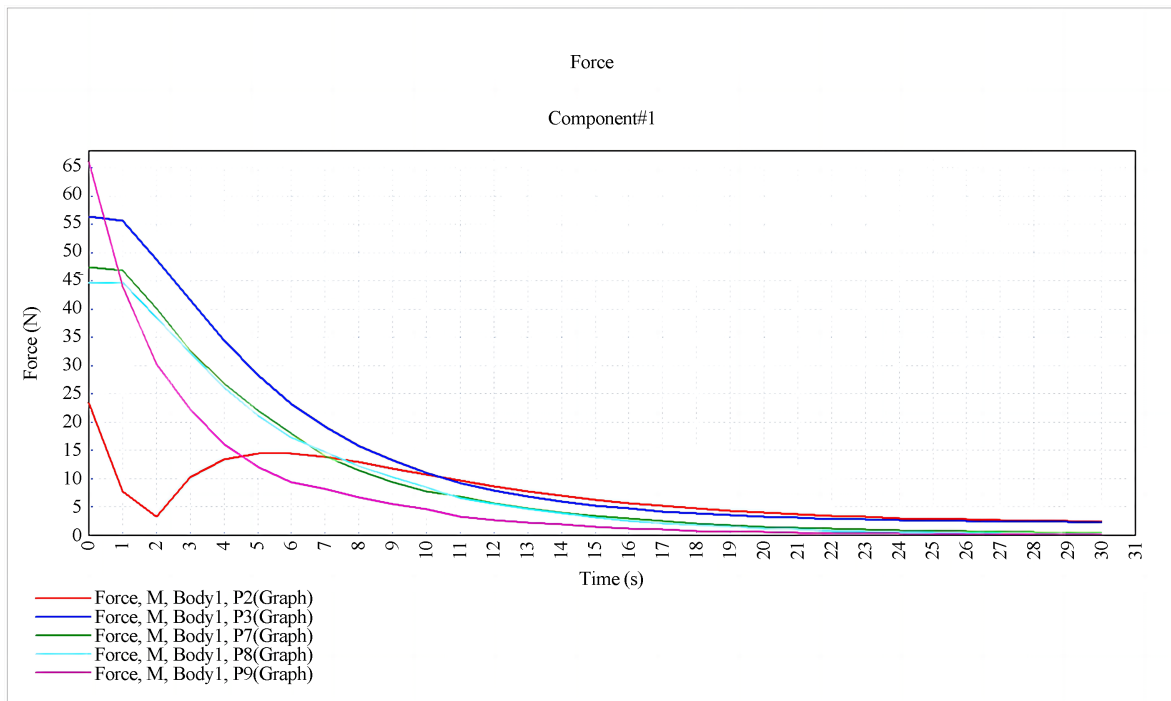


Figure 10. Scheme 3, 5, 6, 7, 8 interactional force curve
图 10. 方案 3、5、6、7、8 相互间作用力的变化曲线

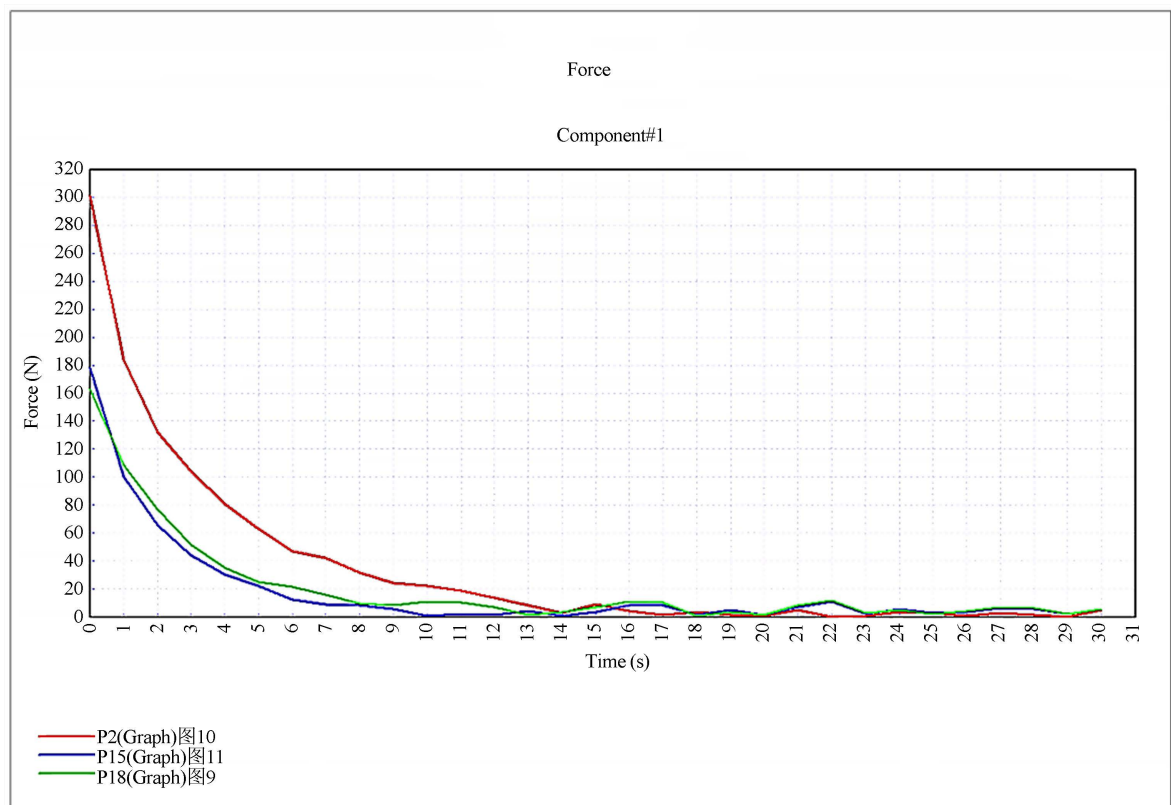


Figure 11. Scheme 9, 10, 11 interactional force curve
图 11. 方案 9、10、11 相互间作用力的变化曲线

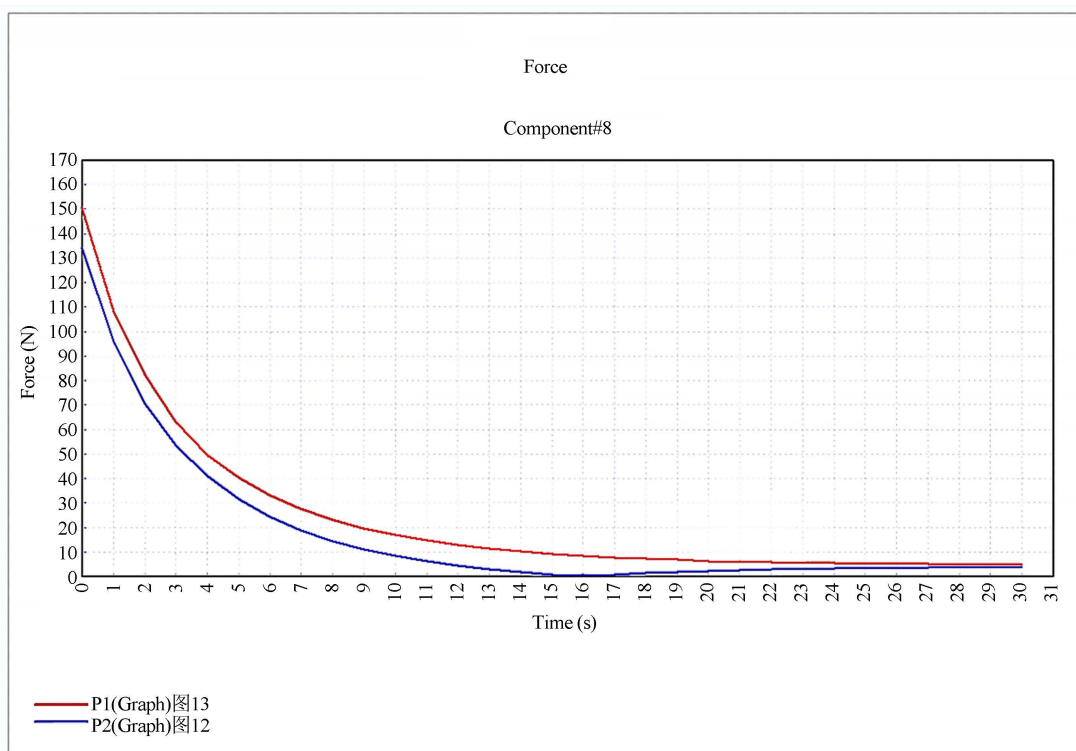


Figure 12. Change curve of scheme 12 and Scheme 13

图 12. 方案 12、13 相互间作用力的变化曲线

如下表 1 所示 13 种方案的磁力最大值。

Table 1. Result of magnetic block arrangement

表 1. 磁块排布方案结果表

方案	磁力最大值/N
1	107
2	68.2
3	44.5
4	32.8
5	66
6	23.4
7	47.5
8	56.3
9	179
10	302
11	163
12	134
13	151

从表中可以得出布置方案 10 情况下所得出的磁力结果最大，因此在底部悬浮结构的选择上采用方案 10，即永磁弹簧采用上下相同的磁环结构，上、下磁极位于磁环的内外两侧。

下图 13 和图 14 分别为方案 10 的布置方案图和磁场矢量图。

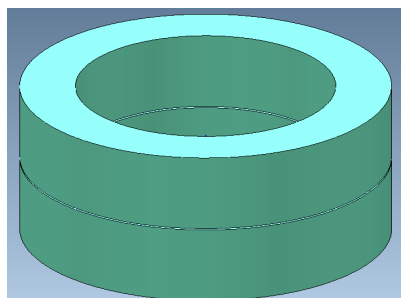


Figure 13. The layout method of scheme 10

图 13. 方案 10 布置方案

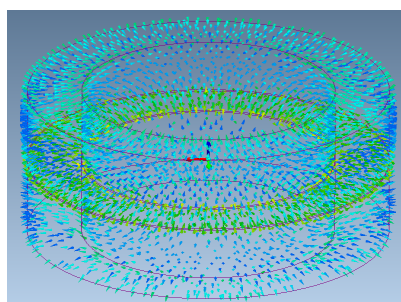


Figure 14. Magnetic field vector diagram of scheme 10

图 14. 方案 10 磁场矢量图

下图 15 显示了五组不同直径的磁铁随着间距增大产生的排斥力。同一磁场下任意区域的排斥力随间距的增大而减小，且呈指数递减趋势，初始递减更明显，后期趋于稳定。当距离达到一定值时，斥力消失。增加接触面积是增加斥力的最好方法[8]。从图中可以看出，所选用 $\phi 50 \times 10$ mm 的磁块即当耦合面积达到 50 mm 时，间距为 5 mm 左右时产生的最大排斥力达到 1800 N，远远大于 120.57 N 的要求，耦合面积越大，磁斥力也就越大，越保险。在电梯的具体使用中，可以有一定的装配误差，设置为 20 mm，根据上图，当接触面积为 40 mm 时，就可以满足使用要求。

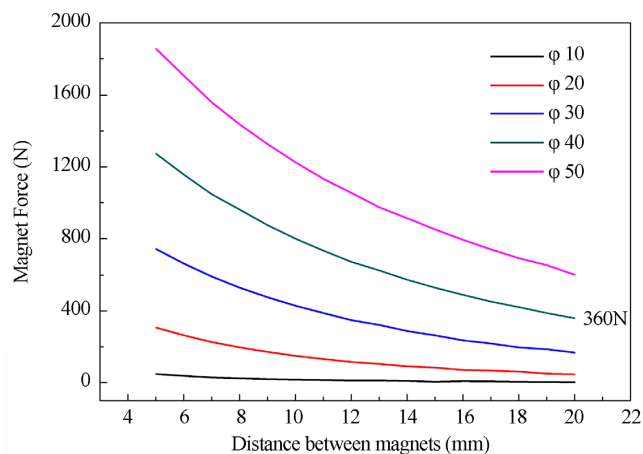


Figure 15. Relation between repulsive force of spring and distance of magnetic block

图 15. 弹簧斥力与磁块距离的关系

5. 总结

1) 设计了永磁涡流电梯缓冲器, 通过将侧面涡流场与永磁体耦合, 通过安装在底部的永磁弹簧实现电梯轿厢的悬停。

2) 优化涡流缓冲器, 设计了各种组合。比较不同组合产生的涡流, 选择了磁体和导体排的最佳解决方案。

3) 分析涡流缓冲器以不同下降速度的停止时间。轿厢的下降速度是非线性的。速度越快, 减速越明显, 减速时间越长。减速停止时间与初始速度基本一致。

4) 分析安装在轿底的永磁弹簧, 对不同直径的永磁进行模拟分析。随着间距的增加, 永磁弹簧的支撑力非线性地减少。磁场强度越大, 支撑力越大。

参考文献

- [1] 华红, 颜廷财. 具有安全气囊电梯缓冲装置[J]. 机械工程师, 2013(12): 205.
- [2] 姚麟琪. 电梯轿厢缓冲装置[P]. 中国专利, CN109179146A. 2019-1-11.
- [3] 石鑫, 胡林华, 陈智渊. 基于磁流变技术的下井电梯缓冲器磁路设计及分析[J]. 商丘师范学院学报, 2018, 34(12): 24-27.
- [4] 崔闯, 赵鹏飞. 浅析新型电梯缓冲器的发展趋势[J]. 中国电梯, 2019, 30(22): 34-35, 37.
- [5] 陈继文, 张献忠, 李鑫. 电梯结构原理及其控制[M]. 北京: 化学工业出版社, 2017: 1-2.
- [6] 蔡长春, 徐智峰. 磁力弹簧的工作特性分析[J]. 现代制造工程, 2003(6): 73-74.
<https://doi.org/10.16731/J.cnki.1671-3133.2003.06.027>
- [7] 张佳佳, 张云鹏. 磁悬浮式电梯缓冲器的设计[J]. 机电信息, 2015(18): 161-162.
<https://doi.org/10.19514/j.cnki.cn32-1628/tm.2015.18.089>
- [8] Li, X.Y. and Wu, J. (2020) Design of Permanent Magnet Damper for Elevator. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2020, 169-175. https://doi.org/10.1007/978-981-15-2341-0_21