



燕山大学
YANSHAN UNIVERSITY

博士学位论文

DOCTORAL DISSERTATION

(学 术 学 位)

论文题名 生物同步康复机制理论与应用

作者姓名 张小明

学科专业 电气工程

指导教师 郭大师 教授

2024 年 6 月

中图分类号：TM464

UDC：621.3

学校代码：10216

密级：公开

学术学位博士学位论文

生物同步康复机制理论与应用

博 士 研 究 生：张小明

导 师：郭大师 教授

申 请 学 位：工学博士

学 科 专 业：电气工程

所 属 学 院：电气工程学院

答 辩 日 期：2024 年 6 月

授 予 学 位 单 位：燕山大学

Bio-Syncretic Rehabilitation Mechanism Theory and Application

A dissertation submitted to

Yanshan University

in partial fulfillment of the requirement for the degree of

Doctor of Engineering

in Electrical Engineering

By

Zhang Xiaoming

Supervisor: Professor Guo Dashi

School of Electrical Engineering, Yanshan University

June, 2024

燕山大学博士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的 博士学位论文《生物同步康复机制理论与应用》，是本人在导师指导下，在燕山大学攻读 博士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文的研究工作作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签字： 日期： 年 月 日

燕山大学博士学位论文使用授权书

《生物同步康复机制理论与应用》系本人在燕山大学攻读 博士学位期间在导师指导下完成的 博士学位论文。本论文的研究成果归燕山大学所有，本论文的研究内容不得以其他单位的名义发表。本人完全了解燕山大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门送交论文的复印件和电子版本，允许论文被查阅和借阅。本人授权燕山大学，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。

保密 ☐，在 年解密后适用本授权书。

本学位论文属于

不保密 ☐。

（请在以上相应方框内打“√”）

作者签名： 日期： 年 月 日

导师签名： 日期： 年 月 日

生物同步康复机制理论与应用

摘要：摘要是论文内容的高度概括，应具有独立性和自含性，即不阅读论文的全文，就能通过摘要了解整个论文的必要信息。摘要应包括本论文研究的目的、理论与实际意义、主要研究内容、研究方法等，重点突出研究成果和结论。

摘要的内容要完整、客观、准确，应做到不遗漏、不拔高、不添加。摘要应按层次逐段简要写出，避免将摘要写成目录式的内容介绍。摘要在叙述研究内容、研究方法和主要结论时，除作者的价值和经验判断可以使用第一人称外，一般使用第三人称，采用“分析了……原因”“认为……”“对……进行了探讨”等记述方法进行检测，避免主观性的评价意见，避免对背景、目的、意义、概念和一般性（常识性）理论叙述过多。

摘要需采用规范的名词术语（包括地名、机构名和人名）。对个别新术语或无中文译文的术语，可用外文或在中文译文后加括号注明外文。摘要中不宜使用公式、化学结构式、图表、非常用的缩写词和非公知公用的符号与术语，不标注引用文献编号。

摘要的字数（以汉字计），硕士学位论文一般为 500~650 字，博士学位论文为 900~1200 字，均以能将规定内容阐述清楚为原则，文字要精练，段落衔接要流畅。

.....

关键词：关键词 1；关键词 2；.....；关键词 8

分类号：TM464

Bio-Syncretic Rehabilitation Mechanism Theory and Application

Abstract: The rehabilitation mechanism is the foundation for a rehabilitation robot to realize its motion, and the quality of the rehabilitation mechanism decides the rehabilitation effect of patients with the rehabilitation robot. The research of rehabilitation mechanism is the key content in rehabilitation engineering. The bio-syncretic rehabilitation mechanism (BSRM) is a new type of modern mechanism composed of human body and machine, and it can meet the design requirements of rehabilitation robot more effectively because of the interaction and harmonization between human body and machine during the rehabilitation exercise. This paper presents the relative systematic research on BSRM and its application. The main contents of this paper are as follows:

The concept of rehabilitation mechanism is proposed based on the relationship between human body mechanism and mechanical mechanism in the rehabilitation kinematics system, and the characteristics, degree of freedom, classification and symbol representation of this new kind of mechanism is introduced. The approaches to type synthesis of parallel BSRM and series BSRM are developed based on screw theory and the characteristic of BSRM, and some parallel BSRMs for ankle joint rehabilitation and series BSRMs for knee joint rehabilitation are got.

Keywords: keyword1; keyword2; ·····; keyword8

Classification: 621.3

目 次

摘要.....	I
Abstract.....	II
第 1 章 绪论	1
1.1 二级标题 1.....	1
1.2 二级标题 2.....	1
1.2.1 三级标题 1	1
1.2.2 三级标题 2	1
第 2 章 第 2 章标题	2
2.1 二级标题	2
第 3 章 第 3 章标题	9
3.1 本章小结	10
第 4 章 结论	11
参考文献	12
附录 A	13
附录 B	14
攻读博士学位期间取得的成果	15
致谢.....	16

第 1 章 绪论

三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零一二三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零一二三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零一二三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零

1.1 二级标题 1

三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零一二三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零一二三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零一二三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零

1.2 二级标题 2

三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零一二三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零一二三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零一二三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零^①

1.2.1 三级标题 1

三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零一二三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零一二三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零一二三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零

1.2.2 三级标题 2

三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零一二三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零一二三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零一二三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零^②

^①党理、科研团队建设、一流课程建设

^②党建工作、科研工作、辅导员队伍建设、学科建设等方面的基本情况。在主题党日谋划、学生应急事件处理、科研团队建设、一流课程建设

第 2 章 第 2 章标题

2.1 二级标题

学位论文的撰写是一个系统性的研究过程，涉及选择主题、制定研究问题、文献综述、确定研究方法、收集和分析数据、撰写论文、修改审阅等步骤。首先，选择一个具有研究意义和足够研究空间的主题，然后明确研究问题，并进行相关文献综述。确定合适的研究方法后，收集和分析数据，根据结论撰写论文，确保逻辑清晰和论证严谨。最后，进行修改审阅，确保论文质量和完整性。整个过程需要耐心和专注，以确保论文的学术价值和质量。

学位论文的撰写是一个系统性的研究过程，涉及选择主题、制定研究问题、文献综述、确定研究方法、收集和分析数据、撰写论文、修改审阅等步骤。首先，选择一个具有研究意义和足够研究空间的主题，然后明确研究问题，并进行相关文献综述。确定合适的研究方法后，收集和分析数据，根据结论撰写论文，确保逻辑清晰和论证严谨。最后，进行修改审阅，确保论文质量和完整性。整个过程需要耐心和专注，以确保论文的学术价值和质量。

学位论文的撰写是一个系统性的研究过程，涉及选择主题、制定研究问题、文献综述、确定研究方法、收集和分析数据、撰写论文、修改审阅等步骤。首先，选择一个具有研究意义和足够研究空间的主题，然后明确研究问题，并进行相关文献综述。确定合适的研究方法后，收集和分析数据，根据结论撰写论文，确保逻辑清晰和论证严谨。最后，进行修改审阅，确保论文质量和完整性。整个过程需要耐心和专注，以确保论文的学术价值和质量。

学位论文的撰写是一个系统性的研究过程，涉及选择主题、制定研究问题、文献综述、确定研究方法、收集和分析数据、撰写论文、修改审阅等步骤。首先，选择一个具有研究意义和足够研究空间的主题，然后明确研究问题，并进行相关文献综述。确定合适的研究方法后，收集和分析数据，根据结论撰写论文，确保逻辑清晰和论证严谨。最后，进行修改审阅，确保论文质量和完整性。整个过程需要耐心和专注，以确保论文的学术价值和质量。

学位论文的撰写是一个系统性的研究过程。

[illegible][illegible]

- 3 -

文献 [1-5] 为参考文献示例^[1-5]。



Fig. 2-2 A single center graphics A single center graphics

图2-3、图2-3(a)、图2-3(b)、图2-3(c)和图2-3(d)为插入多张图片示例。



(a)亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室 (b)精品钢铁生产工艺装备智能化省部共建协同创新中心



(c)国家创新人才培养示范基地 (d)国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心

图 2-3 燕山大学国家基地

[illegible]

三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零一二三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零一二三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零一二三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零一二三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零一二三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零一二三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零

[illegible]



(a)亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室
(a)State Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology



(b)精品钢铁生产工艺装备智能化省部共建协同创新中心
(b)High-quality iron and steel production process equipment intelligence, the Ministry of Chemical Cooperation and Innovation Center



(c)国家创新人才培养示范基地
(c)National Demonstration Base for training innovative talents



(d)国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心
(d)National Research Center for cold-rolled strip equipment and technology

图 2-4 燕山大学国家基地
Fig. 2-4 The national base of Yanshan University

五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零一二三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零

下面是插入行内公式的示例。

勾股定理 $a^2 + b^2 = c^2$ 也被称为商高定理。

下面是插入行间公式的示例。

公式(2-3)可以根据公式(2-1)和(2-2)得到。

$$a = \cos \theta \quad (2-1)$$

$$a^2 + b^2 = 1 \quad (2-3)$$

$$a = \cos \theta \quad (2-4a)$$

$$a^2 + b^2 = 1 \quad (2-4c)$$

表 2-1 System Parameters

Parameter	Description	Value
L	filter inductance	2mH
C	filter capacitance	100 μ F
R	load resistance	10 Ω

Parameter	Description	Value
L	filter inductance	2mH
C	filter capacitance	100 μ F
R	load resistance	10 Ω

- 7 -

[illegible]

三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零一二三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零
 一三二四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零一二三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零
 二三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零一二三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零
 三五四六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零一二三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零
 四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零一二三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零
 五五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零一二三四五六七八九〇壹贰叁肆伍陆柒捌玖零

[illegible]

表3-1为跨页表格示例。

表 3-1 Example Table

第一列	第二列
一流课程建设等方面开展了深入交流	Row 1, Column 2
Row 2, Column 1	Row 2, Column 2
Row 3, Column 1	Row 3, Column 2
Row 4, Column 1	Row 4, Column 2
Row 5, Column 1	Row 5, Column 2
Row 6, Column 1	Row 6, Column 2
Row 7, Column 1	Row 7, Column 2

第 4 章 结论

论文的结论部分是整个研究的归纳和总结，也是对研究问题的回答和对结果的解释。在这一部分中，研究者应该系统性地总结研究的主要发现，并就这些发现的意义进行讨论。同时，应该指出研究的局限性，并提出未来研究的方向。

首先，结论部分应该对研究的核心发现进行简要总结，强调这些发现与研究问题之间的关系。然后，研究者需要讨论这些发现的意义，包括对理论、实践或政策的影响，并强调研究的贡献。此外，应该指出研究的局限性，即研究所面临的限制和可能存在的偏差，并提出改进方法。最后，结论部分应该提出未来研究的方向或建议，以便激发读者的兴趣，并为后续研究提供参考。

总之，结论部分是整个论文的重要组成部分，需要深入总结研究的主要发现，并就这些发现的意义进行深入讨论，同时指出研究的局限性并提出未来研究的方向。

参考文献

- [1] KNUTH D E. The \TeX book[M]. Addison-Wesley Professional, 1986.
- [2] MITTELBACH F, GOSSENS M, BRAAMS J, et al. The \LaTeX companion[M]. 2nd ed. Addison-Wesley Professional, 2004.
- [3] LAMPORT L. \LaTeX : a document preparation system[M]. 2nd ed. Massachusetts: Addison Wesley, 1994.
- [4] KNUTH D E. Literate programming[J]. The Computer Journal, 1984, 27(2): 97-111.
- [5] LESK M, KERNIGHAN B. Computer typesetting of technical journals on UNIX[C]//Proceedings of American Federation of Information Processing Societies: 1977 National Computer Conference. Dallas, Texas, 1977: 879-888.

附录 A

论文的附录通常包括一些额外的材料，用于补充和支持主体文本，但不适合直接放在正文中。以下是一些可能包含在附录中的内容。

$$\theta = \omega t$$

$$a = \cos \theta \tag{A-1}$$

$$b = \sin \theta \tag{A-2}$$

$$a^2 + b^2 = 1 \tag{A-3}$$

$$\theta = \omega t$$

$$a = \cos \theta \tag{A-4a}$$

$$b = \sin \theta \tag{A-4b}$$

$$a^2 + b^2 = 1 \tag{A-4c}$$

附录 B

论文的附录通常包括一些额外的材料，用于补充和支持主体文本，但不适合直接放在正文中。以下是一些可能包含在附录中的内容。

$$\theta = \omega t$$

$$a = \cos \theta \tag{B-1}$$

$$b = \sin \theta \tag{B-2}$$

$$a^2 + b^2 = 1 \tag{B-3}$$

$$\theta = \omega t$$

$$a = \cos \theta \tag{B-4a}$$

$$b = \sin \theta \tag{B-4b}$$

$$a^2 + b^2 = 1 \tag{B-4c}$$

攻读博士学位期间取得的成果

1. 发表的学术论文

- [1] ×××, ×××. 并联 2-RRR/UPRR 踝关节康复机器人机构及其运动学 [J]. 机器人, 2010, 32(1): 6-12. (EI 收录号: 20101212786168)
- [2] ×××, ×××. 空间并联机构连续刚度非线性映射研究 [J]. 机械工程学报, 2008, 44(8): 20-25. (EI 收录号: 083911606237)
- [3] ×××, ×××. A sampling robot for high dust and strong corrosion environment[C]//International Conference on Robotic and Biomimetics, Tianjin, 2010: 828-832. (EI 收录号: 20111313856140)
- [4] ×××, ×××. 双重驱动四自由度并联机构型综合 [J]. 机械设计与研究, 2008, 24(1): 51-53.
- [5] ... 要与参考文献格式一致!!!

2. 发表的专著/译著（无著作时此项不必列出）

- [1] ×××, ×××. 高等空间机构学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [2] ×××, ×××. 空间并联机构导论 [M]. ×××, 译. 秦皇岛: 燕山大学出版社, 2020.

3. 申请及已获得的专利（无专利时此项不必列出）

- [1] ×××, ×××. 具有远程运动中心的三自由度转动并联机构: 中国, 200910073844.8 [P]. 2011-01-05.
- [2] ×××, ×××. 五自由度双重驱动并联机构: 中国, 200910075071.7 [P]. 2011-01-05.

4. 科研获奖（无奖励时此项不必列出）

- [1] ×××, ×××. 机器人机型综合及结构分析理论. XX 省科学技术二等奖, 2009.

致 谢

本论文的顺利完成，离不开导师 XXX 老师的悉心指导和教诲。在研究过程中，导师给予了我充分的自由空间和宝贵的建议，让我受益匪浅。

同时，我要感谢实验室的师兄师姐们，他们在实验设备的使用和数据分析方面给予了我大量的帮助。他们的热情和支持让我在科研道路上走得更远。

最后，我要特别感谢我的家人。是他们的无私支持和理解，让我能够全身心地投入到研究工作中，顺利完成了这篇论文。