

分类号：公开
密 级：TH139

学校代码：10363
学 号：2220110111



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 基于永磁调速器的循环水厂
 泵站系统节能研究

论 文 作 者 汪杰
校 内 导 师 徐曼曼 副教授
校 外 导 师 王向东 高级工程师
专业学位类别 机械
研究方向（领域） 流体机械

论文提交日期： 2025 年 5 月 20 日

分类号：TH139

学校代码：10363

密 级：公开

学 号：2220110111

基于永磁调速器的循环水厂泵站系统节能研究

Research on energy saving of circulating water plant pumping
station system based on permanent magnet governor

学生姓名	汪杰
校内导师	徐曼曼（副教授）
校外导师	王向东（高级工程师）
专业	机械
研究方向	流体机械

论文答辩日期： 2025 年 5 月 13 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：汪杰

日期：2025年5月15日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 ____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：

汪杰

指导教师签名：

徐昌俊

日期：2025 年 5 月 15 日

日期：2025 年 5 月 15 日

基于永磁调速器的循环水厂泵站系统节能研究

摘 要

循环水厂泵站系统作为化工领域的关键设备，其能耗问题备受关注。传统泵站系统采用阀门调节流量，但能耗过高。随着全球能源紧缺问题日益严峻和“双碳”目标的提出，此调节方式难以满足当前节能降耗的迫切需求。为解决上述问题，本研究基于永磁调速器在调速方面的优势，将其应用于泵站系统，进行节能优化研究，主要包括以下几个方面的内容：

首先，基于 Halbach 阵列的永磁调速器设计。基于永磁调速器的组成及基本原理，设计永磁调速器的结构，研制出采用 Halbach 阵列方式的永磁调速器。相较于普通 N-S 排列，Halbach 阵列可使气隙磁通密度和输出转矩提升一倍。通过等效磁路法建立永磁调速器数学模型，推导输出转矩公式。结果表明，输出转矩主要受转速差、不同开度以及铜环厚度等因素的影响。

其次，基于 Maxwell 软件开展磁场特性研究，分析永磁调速器传动特性。研究表明，永磁调速器的输出转矩受多种因素影响，当开度保持不变时，输出转矩随转速差的增大呈先增后减的变化规律；而在转速差不变时，输出转矩与开度呈正相关关系；此外，铜环厚度对输出转矩影响显著，随着铜环厚度的增加，输出转矩不断变大。

随后，验证永磁调速器的传动特性，搭建循环水厂泵站系统实验平台，对比分析将永磁调速器运行的实验数据与有限元仿真结果，两者误差在 5%以内。

最后，开展转速调节研究，借助永磁调速器调节离心泵的输出转速，验证了阀门调节和转速调节，结果表明，转速调节的方式更为节能。当三台离心泵并联运行时，转速调节最高节能率可达 15.7%。建立并联离心泵数学模型，推导出同型号离心泵同转速调节运行方式最为节能，通过实验验证，在流量为 $30\text{m}^3/\text{h}$ 时，随着转速配置比的增加，相对节能率在不断提高，最高达到 10.08%，为泵站系统的运行方式提供参考。

本课题将永磁调速器应用于循环水厂泵站系统中，利用永磁调速器对离心泵输出转速加以调控，从而实现对系统流量的调节。为泵站系统的节能与运行提供了一种切实可行的技术方案，具有参考意义。

关键词：永磁调速器，泵站系统，节能优化，Halbach 阵列，转速调节

RESEARCH ON ENERGY SAVING OF CIRCULATING WATER PLANT PUMPING STATION SYSTEM BASED ON PERMANENT MAGNET GOVERNOR

ABSTRACT

The pump station system of the circulating water plant, as a key equipment in the chemical industry, has drawn much attention to its energy consumption issue. The traditional pumping station system uses valves to regulate the flow rate, but the energy consumption is too high. With the increasingly severe global energy shortage and the proposal of the "dual carbon" goals, this regulation method is difficult to meet the current urgent need for energy conservation and consumption reduction. To solve the above problems, based on the advantages of permanent magnet speed regulators in speed regulation, this study applies them to the pumping station system for energy-saving optimization research, mainly including the following aspects:

Firstly, the design of permanent magnet governor based on Halbach array. Based on the composition and basic principle of the permanent magnet governor, the structure of the permanent magnet governor was designed, and the permanent magnet governor adopting the Halbach array mode was developed. Compared with the common N-S arrangement, the

Halbach array can double the air-gap flux density and output torque. The mathematical model of the permanent magnet governor is established by the equivalent magnetic circuit method, and the output torque formula is derived. The results show that the output torque is mainly affected by factors such as the speed difference, different openings and the thickness of the copper ring.

Secondly, the magnetic field characteristics were studied based on Maxwell software, and the transmission characteristics of the permanent magnet speed controller were analyzed. The research shows that the output torque of the permanent magnet speed controller is affected by multiple factors. When the opening degree remains unchanged, the output torque shows a variation law of first increasing and then decreasing with the increase of the speed difference. When the speed difference remains unchanged, the output torque is positively correlated with the opening degree. In addition, the thickness of the copper ring has a significant impact on the output torque. As the thickness of the copper ring increases, the output torque keeps growing.

Subsequently, verify the transmission characteristics of the permanent magnet governor. An experimental platform for the pumping station system of the circulating water plant was established. The experimental data of the operation of the permanent magnet governor and the finite element simulation results were compared and analyzed, and the error between the two was within 5%.

Finally, the research on rotational speed regulation was carried out. The output rotational speed of the centrifugal pump was regulated with the help of the permanent magnet governor. The valve regulation and rotational speed regulation were verified. The results show that the method of rotational speed regulation is more energy-efficient. When three

centrifugal pumps operate in parallel, the maximum energy-saving rate of speed adjustment can reach 15.7%. A mathematical model of the parallel centrifugal pump was established. It was derived that the operation mode of regulating the same rotational speed for the same model of centrifugal pump was the most energy-efficient. Through experimental verification, when the flow rate was 30, with the increase of the rotational speed configuration ratio, the relative energy-saving rate was continuously improving, reaching up to 10.08% at the highest, providing a reference for the operation mode of the pumping station system.

This project applies the permanent magnet speed regulator to the pumping station system of the circulating water plant. The output speed of the centrifugal pump is regulated by the permanent magnet speed regulator, thereby achieving the regulation of the system flow. It provides a practical and feasible technical solution for the energy conservation and operation of the pumping station system and has reference significance.

KEY WORDS: permanent magnet governor, pump station system, energy saving optimization, Halbach array, speed adjustment

目录

摘 要	I
ABSTRACT.....	III
目录	VI
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.1.1 循环水厂泵站系统研究背景及意义	1
1.1.2 永磁调速器研究背景及意义	2
1.2 永磁调速器研究现状.....	4
1.3 论文的课题支撑及研究内容.....	8
1.3.1 论文课题支撑项目	8
1.3.2 论文研究内容安排	8
第 2 章 永磁调速器的设计	10
2.1 引言	10
2.2 永磁调速器的组成及原理.....	10
2.3 永磁调速器的结构设计.....	11
2.3.1 导体转子设计	11
2.3.2 永磁转子设计	11
2.3.3 永磁体设计	12
2.3.4 移动底座设计	13
2.4 Halbach 阵列排布	14
2.5 永磁调速器的数学模型建立.....	17
2.6 本章小结	21
第 3 章 永磁调速器传动特性研究	22
3.1 引言	22
3.2 麦克斯韦方程组.....	22
3.3 永磁调速器有限元模型建立.....	23
3.3.1 有限元分析法介绍	23
3.3.2 基本假设	24
3.3.3 有限元模型建立	24

3.3.4 材料属性设定	25
3.3.5 基本参数设置	25
3.4 不同转速差下的传动特性	26
3.5 不同开度下的传动特性	32
3.6 不同铜环厚度下的传动特性	35
3.7 本章小结	36
第 4 章 永磁调速器在泵站系统上的应用	37
4.1 引言	37
4.2 循环水厂泵站系统样机的设计与搭建	37
4.2.1 建模过程	37
4.2.2 实验设备及选型	41
4.2.3 样机制作	44
4.3 永磁调速器传动特性实验	45
4.3.1 实验装置及实验内容	45
4.3.2 实验结果及数据分析	46
4.4 永磁调速器的调速特性	48
4.5 本章小结	49
第 5 章 泵站系统节能研究	50
5.1 引言	50
5.2 离心泵节能原理	50
5.3 泵站系统不同调节方式节能研究	52
5.3.1 实验方案设计	52
5.3.2 实验过程	53
5.3.3 实验结果及数据分析	54
5.4 泵站系统并联运行方式节能研究	59
5.4.1 离心泵并联运行特点	59
5.4.2 离心泵并联数学模型	59
5.4.3 实验方案	63
5.4.4 实验结果分析	64
5.5 本章小结	66
第 6 章 总结与展望	68
6.1 总结	68
6.2 展望	69

参考文献	70
攻读学位期间的科研成果目录	75
致谢	76

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 循环水厂泵站系统研究背景及意义

循环水厂泵站系统在水资源循环利用与调配中占据关键地位。随着工业化、城镇化的快速推进，水资源需求持续上升，各行各业对稳定可靠的供水要求愈发严格，循环水厂作为水资源循环利用与调配的关键枢纽，其泵站系统是整个水循环链条中的核心动力元件^[1]。在工业领域中，大型工厂如钢铁、化工、火电等，在生产过程需消耗大量的冷却水，如图 1-1 所示。这些冷却水经泵站系统抽取、处理后实现重复利用，以保障生产线的不停运转。现代工业向着规模化、集约化方向不断发展，生产工艺对流量的需求近乎苛刻^[2]。然而，传统泵站系统在应对复杂工业用水需求时，采用阀门调控流量，常面临能耗过大、设备易损坏等问题^[3]。从生态环境角度看，合理运行泵站系统有助于节能减排。但部分泵站系统因缺乏设备优化，能耗过高，不仅增加运营成本，还间接加大了碳排放，与当下绿色发展理念相悖^[4]。如今，能源问题日益严峻，节能已成为各行业发展的权衡要素，循环水厂泵站系统作为高能耗设施，节能潜力巨大，对缓解能源压力意义非凡^[5]。在过去的几年里，随着国家工业的发展，社会用电量也在逐年增加。因此，在“双碳目标”的引领下，提升泵站系统设备运行效率、杜绝不必要的能源损耗，成为国家重点关注的关键任务^[6]。



图 1-1 循环水厂泵站系统

泵站系统在多个领域广泛应用，但其运行过程中存在能源浪费问题。泵站系

统作为一种用于传输液体的传输系统,被广泛应用于化工、石油和冶金等各个领域。在运行过程中,电机作为动力源装置被用于带动离心泵的运行^[7],其扮演着相当关键的角色。根据数据显示,在全国的耗电总量中,风机、离心泵等设备每年的耗电量占比超过 30%^[8],但在使用设备时常存在能源浪费的现象^[9]。主要原因是在工程选型中,例如对离心泵常留有 10%~20%的余量,通常会以其承受的最大负载功率为基准选取电机。但在实际生产时,由于各种因素的影响,很少能达到最大负载功率^[10],使得电机大部分时间在低效区域运行。此外,在离心泵系统需要根据生产需求而变动流量时,若采用阀门调节流量,电机和负载的转速会维持恒定,消耗功率也会保持不变,导致很多能量在阀门处被无效损耗^[11]。

对于这种现象的发生,近年来国家大力提倡电机调速设备。在维持电机转速不变的前提下,利用调速装置灵活调节负载转速的特征,达到减少能耗的目的。对于大功率负载电机而言,节能效果极为显著,节能潜力巨大。因此,采用先进的调速技术,如使用永磁调速器进行调速,会成为改善泵站系统性能、达成节能优化的高效途径之一。

1.1.2 永磁调速器研究背景及意义

在工业快速发展的背景下,各类机械设备广泛应用于能源、制造、化工等领域,确保其高效运行成为关键。随着工业领域对节能减排和设备可靠性的要求不断提高,传统调速设备如液力耦合器和变频器,尽管在过去取得了一定成效,但逐渐显现出诸多局限性^[12]。

液力耦合器主要通过泵轮和涡轮相互作用以达到传递动力和调节转速的效果^[13],如图 1-2 所示。然而,液力调速器传递动力效率较低,并且存在漏油污染环境以及维护成本高等问题。特别是在对环保要求严苛的当下,其应用场景受限,像石油化工企业,若液力耦合器发生漏油,不仅会导致生产中断,还可能引发安全隐患^[14]。



图 1-2 液力耦合器

变频器通过改变电源频率和电压,实现精准调节电机转速以适配不同工况需求。与传统阀门和液力耦合器调节相比,变频调节不仅调速精准、调速范围广,而且在启停时能够平稳无冲击^[15]。然而,对于变频器应用在大功率电机输出场合仍然面临关键问题^[16]:首先,变频器不仅购置成本不低,后续维护保养也会产生较高费用,部分变频器还需额外安装冷却设备维持正常运行^[17];其次,在运行过程中,由于自身内部的晶体在进行切换时会使电流和电压携带高次谐波成分,容易对外产生谐波干扰,难以在矿井、易燃易爆这类条件严苛的场所实现稳定运行^[18]。如图 1-3 所示,对于已经应用的大型设备容易受到现场安装条件的限制,难以安装结构复杂且对环境要求较高的变频器。

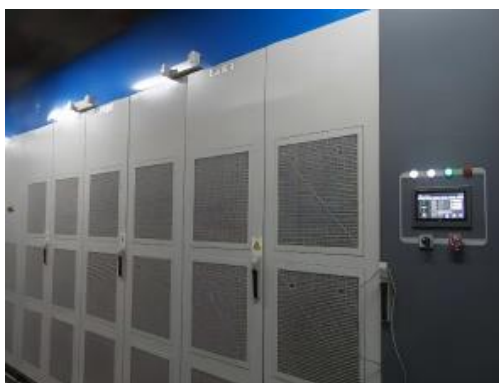


图 1-3 变频器

近年来,永磁调速技术凭借非接触传动特性取得了显著发展。通过永磁材料所研发出的永磁调速器,与刚性联轴器相比,它能承受较大的对中安装误差,在平稳启动的同时还能减缓机械振动^[19]。永磁调速器不但具有出色的调速效率,而且适用范围广。在化工、循环水厂等行业中能够灵活调节负载侧的转速,不仅能够提升设备运行的稳定性与可靠性,还能缩小设备占地空间^[20]。与其他调速系统

相比如表 1-1 所示，其结构示意图如图 1-4 所示。

表 1-1 各种调速系统的对比

调速系统	液力耦合器	变频器	永磁调速器
工作原理	液体动能变化	改变电机频率	电磁感应和磁场相互作用
软起动	无	无	无
过载保护	滑差保护	对流保护	滑差保护
系统减震	好	差	好
维修费用	高	高	低
环境适应	中	最差	好
总体效率	80%~90%	75%~90%	94%~97%
缺点	漏油污染环境、维护成本高	振动、谐波问题	价格昂贵

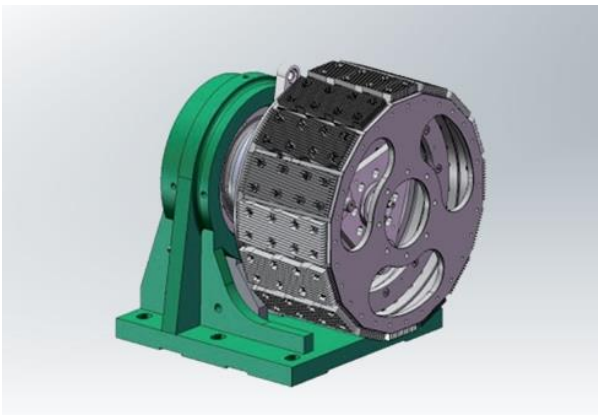


图 1-4 永磁调速器

在循环水厂泵站系统中，相较于传统阀门、液力耦合器及变频器等调节设备，永磁调速器展现出显著的技术优势。鉴于其在节能降耗方面的突出表现，开展永磁调速器在该领域的应用研究具有重要的实践价值。这一研究不仅能够优化泵站系统的运行效率，还为企业实现节能降耗提供新的技术路径。

1.2 永磁调速器研究现状

通过对永磁调速器发展历程的回顾，结合典型文献的研究成果，本节将从理论分析、结构设计和仿真优化等方面，对永磁调速器的研究现状进行阐述。鉴于各类永磁调速器通常都包含永磁转子和导体转子这两大核心部件，需充分考虑这一结构特点，在理论分析和仿真优化过程中，各类研究方法之间通常存在紧密联系，相互间有很强的借鉴价值。

永磁调速器的研究在国外开启时间较早，早在 1930 年就提出了永磁传动技术。然而，由于当时人们对这项技术的认知有限，再加上永磁材料发展滞后，相

关研究进展缓慢，当时的研究仅局限于实验阶段。直到 1970 年，随着人类环保意识的逐步增强，现代工业由资源导向型向技术导向型逐渐转变，特别是第三代钕铁硼料的出现，极大地改善了磁性材料的特性，使得磁传动技术迎来了快速发展的新阶段^[21]。

1990 年，A.Wallace^[22]等人使用钕铁硼永磁体取代电磁铁，通过具有高能量积的永磁体来传递转矩，成功制造出永磁耦合器并对其构造进行测试，对未来的发展和应用奠定基础。1999 年，MagnaDrive 公司^[23]将永磁耦合传动技术应用到工业领域并进行了改良，实现对转速控制效果的提升，系统的可靠性得以增强。

2001 年，A.Wallace^[24]教授通过对永磁调速器结构进行研究，设计一种盘式调速器，盘式永磁调速器采用铜盘感应磁场与原始磁场相互作用的原理实现转速和转矩的传递，该装置结构简单，零部件数量较少，不仅实现了无摩擦、非接触的运行方式，还减少了安装复杂度，同时降低了对中精确要求。

2003 年，A.Canova^[25]优化了永磁调速器定子与转子部件的设计，如图 1-5 所示，通过分离变量法对永磁调速器的各个部件进行了简化。2005 年，B.Vusini^[26]通过建立有限元分析二维模型，对影响输出转矩特性的定子与转子部件进行仿真优化，提升了永磁调速器的输出性能。

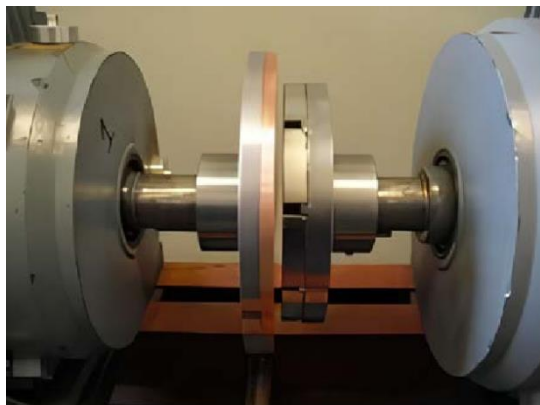


图 1-5 Canova A 设计的实验装置

2012 年，T.Lubin^[27]通过等效磁路法对永磁调速器构建数学模型，并对其结构参数进行系统性分析，通过观察不同结构参数对调速特性所带来的影响，在有限元中搭建三维模型并进行仿真求解计算，通过搭建实验平台获取实测数据，将仿真结果与数学模型进行对比验证，从而评估数学模型的精确性。

2014 年，S.Mohammadi^[28]依据法拉第定律以及安培定律，构建起一种全新

的永磁调速器分析框架,该方法全面考虑了铁磁材料的磁饱和特性和磁导率,以及永磁材料的剩磁与矫顽力要素。依靠此方法,在有限元分析软件中能够更高效地计算永磁调速器的输出转矩,对于获取优化结果十分有利。此外,为验证数据可靠性,还制作实体模型对输出转矩进行实验测试。

2018 年,V.Aberoomand^[29]等人基于永磁调速器三维模型,借助等效磁路法搭建起一个稳态模型,采用遗传算法对各部件结构尺寸进行参数化处理,经过改进后的设备,传动特性更为稳定。同年,H.ShinK 等人^[30]对永磁调速器的磁场进行分析,提出了一种新的输出转矩计算方法,为确保计算结果的精确性,通过仿真和实验对其进行验证分析,进一步确认该方法的可靠性与有效性。

2021 年,Belguerras^[31]针对永磁调速器的磁场分布问题,提出了一种二维解析计算方法用于求解磁场分布问题,该方法通过仿真与实验相结合的方式,对所建立的磁场分布模型进行了有效性验证。

综上所述,在永磁传动技术领域,国外学者已开展了较为深入的研究工作,根据结构特征,研究人员将永磁调速器系统划分为轴向和径向两种主要类型,并构建了对应的三维解析模型。通过理论与仿真对永磁调速器的各个部件以及结构参数展开了多层面的研究与剖析,同时,为确保研究结果的准确性,对所提出的方法或模型进行实验验证。

我国永磁传动技术的研究与应用起步相对较晚,但得益于永磁材料科学的快速发展,这一新兴传动技术领域已引起学术界广泛关注,随着研究队伍的不断扩大,该技术体系不断深化发展,研究范畴持续加深,呈现出蓬勃的发展态势。

我国对永磁调速器技术的研究始于 20 世纪 80 年代后期,标志着该领域应用探索的正式启动^[32]。甘肃省科学院磁性器件有限责任公司作为我国最早涉足永磁传动技术开发的高新技术企业,自 80 年代成立起,便投身于相关研究与产品开发工作。该公司应用永磁传动技术有效解决了过往机械密封常出现的泵泄漏等一系列难题。

在 2001 年,基于等效磁荷理论,杨志轶^[33]研究员带领的研究团队运用等效磁荷理论,成功建立轴向磁性联轴器的扭矩传递数学模型,通过实验样机验证了该模型的可靠性。次年,江苏大学杨超君^[34]应用反求设计技术,以现有磁力联轴

器为基础，研发出一款更适用于高温工况的磁力调速器，通过搭建了实验平台开展相关测试以验证该方案的可靠性。

2011 年，王金博^[35]深入剖析影响永磁调速器输出转矩的各项因素，以此为依据，对永磁调速器的各部件结构参数展开优化研究。同年，为优化磁力联轴器的扭矩传递性能，袁丹青^[36]对磁体阵列特性展开了系统性研究，重点探讨了永磁体对磁场分布模式的影响机制，并对磁化规律进行了深入分析。

2012 年，王旭^[37]研究团队通过静态磁场分析，成功研制了一款结构简化的轴向永磁调速装置，并揭示了铜环内部磁通在轴向方向分布规律及其特性。同年，葛研军^[38]构建了电磁转矩模型，通过理论计算分析其机械特性，借助仿真软件对计算结果进行模拟验证，通过实验探究该模型的机械特性。

2015 年，孙中圣^[39]对筒式永磁调速器开展深入研究，系统性分析磁场特性与结构参数之间的内在联系，该研究不仅阐明了设备内部磁场和涡流的分布特征，还基于这些内在联系对调速器结构进行了优化改进。同年，李延民^[40]对轴向式联轴器转矩进行理论层面的剖析，运用有限元方法，模拟探究永磁体参数对转矩和轴向力的影响变化规律。

2017 年，时剑文^[41]通过研究矿用型永磁调速器的传递转矩与转速，对不同负载的匹配情况进行分析，探索其调速特性和节能效果，对矿用设备的运行提供了重要的参考价值。

2018 年，陶前程^[42]等科研人员设计了聚磁式永磁调速器，其独特之处在于永磁转子内部设有磁障，这一设计显著降低了永磁体的漏磁现象，从而增强了永磁体的使用效率，并调高了调速器的输出转矩。

2019 年，吴明^[43]开发了一种盘式永磁调速器的三维瞬态分析模型，特别关注其不同条件下的调速性能，通过对调速器结构参数的详细研究，提出了改进措施，进一步提升了其输出转矩。

2020 年，王成龙^[44]针对筒式永磁调速器的传动性能展开研究，借助 Maxwell 的二维和三维瞬态磁场仿真模块，深入剖析了影响永磁调速器传动性能的相关因素。

2021 年，王健^[45]以笛卡尔坐标系为基础，使用磁矢量公式建立一种新的三

维分析模型。通过实验验证，该模型可有效评估永磁调速器的转矩传递特性，证实了该模型具有可靠性。

2023 年，邸子瑞^[46]针对大功率盘式永磁调速器展开深入研究，通过构建盘式调速器的数学模型，采用有限元方法进行仿真分析，系统地探讨了该调速器的磁场分布特征、涡流损耗规律以及涡流密度分布特性。同年，张洪明^[47]开发一种新的轴向一径向磁通混合永磁调速器。通过永磁体和励磁电流来分别产生径向和轴向磁通，通过建立有限元分析模型对磁场、电磁和温度分别进行计算。该模型能够大大缩短 3D 分析计算时间，同时还考虑感应电流引起的磁场效应，使得模拟出的永磁调速器传动性能可以更精确。

总的来说，国内外在永磁调速器理论研究方面已经比较成熟，为相关领域的发展提供了坚实的技术支持。但永磁调速器仍存在许多的问题需待解决：永磁调速器的理论分析和设计涉及机械、流体、有限元等多门学科，在其研究过程中基础知识内容较多，甚至还要与其他专业知识相结合，因此对永磁调速器使用领域的研究带来了困难。永磁调速器在实际生产运行时，由于输出转矩低，往往需要使用大量永磁体，这无疑大幅提高了生产成本；现有的研究都是分析永磁调速器的输出特性，并没有分析永磁调速器在实际运行中的节能效果。

1.3 论文的课题支撑及研究内容

1.3.1 论文课题支撑项目

本论文由以下科研项目支撑：

- (1) 国家自然科学基金青年项目（12205004）。
- (2) 安徽省优秀青年教师培育项目重点项目（YQZD2024018）
- (3) 安徽省博士后科研项目（2024C976）
- (4) 安徽工程大学-鸠江区产业协同创新专项基金项目（2022cyxtb8）

1.3.2 论文研究内容安排

本文提出采用永磁调速器替代传统阀门，将其应用在循环水厂泵站系统中，通过永磁调速器对离心泵进行转速调节来研究节能效果，降低设备的运行成本。主要研究内容如下：

第一章：介绍本文的研究背景。调研循环水厂泵站系统目前存在的 key 问题

以及永磁调速器的应用背景，介绍永磁调速器的研究现状，结合永磁调速器的结构优势，提出本文的研究对象。

第二章：永磁调速器的工作原理与结构设计。首先阐述永磁调速器的组成及基本原理，随后进行结构设计，并对不同永磁体排布方式进行对比分析。通过等效磁路法对 Halbach 阵列下的永磁调速器进行数学建模，推导影响其输出转矩的相关因素。

第三章：永磁调速器的传动特性研究。利用 Maxwell 软件进行深入分析，探讨了永磁调速器在不同转速差、不同开度及铜环厚度等条件下对输出转矩的影响，通过仿真软件对永磁调速器的运行性能进行深入研究，为其量产提供理论依据。

第四章：永磁调速器在泵站系统上的应用。制作永磁调速器样机，设计一整套循环水系统，并对水循环系统所需器材进行选型，将永磁调速器应用于泵站系统中，通过搭建实验样机对永磁调速器的传动特性进行测量，将测量结果与有限元仿真结果进行对比，验证有限元分析的准确性。

第五章：泵站系统的节能研究。在泵站系统中调节永磁调速器行程与电动调节阀的开度，对比分析转速调节与阀门调节、部分转速调节的节能情况，验证转速调节更为节能。建立并联离心泵数学模型，推导出同型号离心泵同转速调节的运行方式最为节能，并通过实验进行验证，为泵站系统的运行方式提供节能研究。

第六章：总结与展望。本章对全文进行了总结，分析了研究中的不足之处，并提出了未来需要进一步探索的方向，为后续研究提供了参考依据。

第 2 章 永磁调速器的设计

2.1 引言

本章阐述了永磁调速器的工作原理，主要是利用感应涡流产生的感应磁场进行转矩传递，通过调整导体转子与永磁转子的耦合面积来实现对负载转速的控制。永磁调速器的具体设计包括导体与永磁转子、永磁体、移动底座等。本章还对不同的永磁排布方式进行了对比与分析，并建立了等效磁路模型，以 Halbach 阵列的永磁调速器为目标，基于能量守恒原理，推导出永磁调速器的输出转矩公式。研究表明，输出转矩主要受转速差、不同开度及铜环厚度等因素的影响。

2.2 永磁调速器的组成及原理

永磁调速器作为调速设备，能够应用在离心泵、风机等大型负载设备。在我国节能减排理念日益普及的当下，因其结构简单、节电效果显著、故障率低、能隔振降噪等优势，正备受工业领域的关注。如图 2-1 所示，该模型的核心结构由导体转子、永磁转子、输入和输出轴构成，其中，导体转子与输入轴固定连接，由导体筒与铜环组成；永磁转子则与输出轴固定连接，由永磁体和永磁托盘组成，两个转子之间保持着非接触状态。

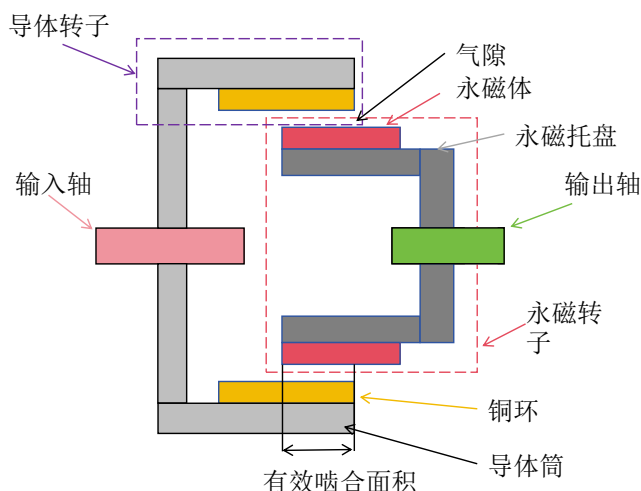


图 2-1 永磁调速器结构模型

电机启动时，输入轴带动导体转子旋转，通过铜环切割永磁体自身的磁感线产生感应涡流。感应涡流生成感应磁场，与永磁磁场相互作用产生转矩来驱动输出轴转动。调节导体转子与永磁转子的耦合面积，可实现负载转速的调控，这一

过程遵循楞次定律。

深入剖析永磁调速器的组成及工作原理，充分掌握其调节理论，为后续设计永磁调速器结构以及开展相关分析提供参考。

2.3 永磁调速器的结构设计

2.3.1 导体转子设计

导体转子是永磁调速器的关键部件之一，在形状上，导体转子一般为圆盘状，这种结构设计能够保证在旋转过程中，铜环高效切割磁感线以提高磁场的利用率。如图 2-2 所示，在导体转子圆盘的表面或侧面，沿特定方向均匀开设一定深度的凹槽和通孔，这样设计不仅增加了导体转子与外界空气的接触面积，还能引导空气流动形成散热通道。当导体转子高速旋转时，外界冷空气被吸入盘内，带走热量，从而有效降低导体转子的温度。

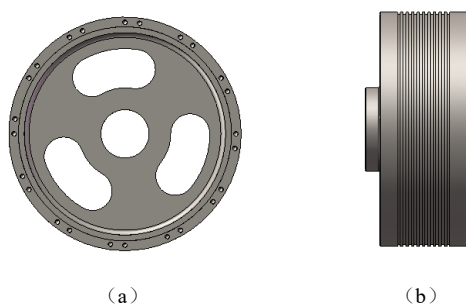


图 2-2 导体转子结构模型

2.3.2 永磁转子设计

在设计永磁转子时，需要充分考虑运行安全。永磁体在永磁转子上的固定方式有两种，一是采用卡贴的形式，将永磁体固定在永磁盘壁上；二是在永磁转子上开槽，把永磁体嵌入其中。如果采用卡贴的形式将永磁体固定在永磁盘壁上，在使用高转速电机时，转速太快可能会使永磁体发生振动，进而影响调速器输出性能，故使用开槽式结构对永磁转子进行设计。

永磁转子分为永磁托盘、永磁端盖和永磁法兰。在永磁托盘的两端，设计永磁端盖和永磁法兰，通过螺栓将永磁托盘固定，防止永磁体左右晃动。通过在永磁托盘内开槽，将永磁体嵌入永磁托盘内，能够防止永磁体振动，如图 2-3 所示。

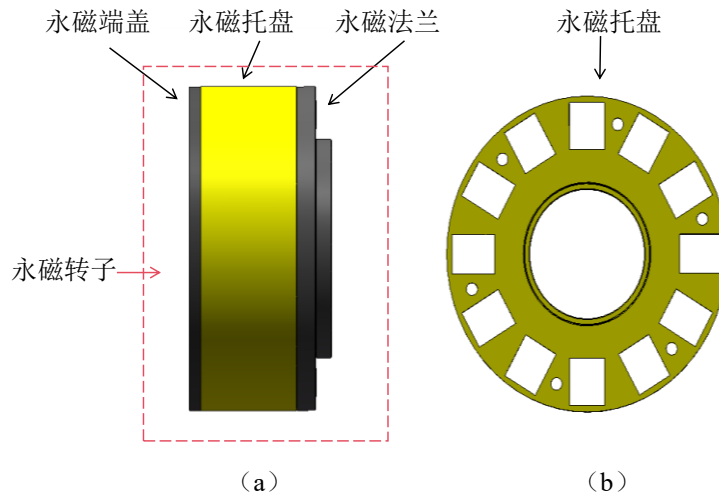


图 2-3 永磁转子结构模型

2.3.3 永磁体设计

在永磁调速器运行过程中，感应涡流的生成源于对永磁体磁感线的切割，这一过程是实现转矩传递的核心。其中，永磁体所散发的磁感线是决定转矩大小的关键要素。所以，永磁体选型起着至关重要的作用，常见的选型材料如表 2-1 所示。

表 2-1 常见的永磁选型材料

材料	温度系数	最大磁能积	剩磁	居里温度	矫顽力
单位	%/°C	KJ/m ³	T	°C	KA/m
钕铁硼	-0.126	247-263	≥ 0.117	320-460	≥ 844
铁氧体	-0.18	≥ 27	≥ 0.39	465	≥ 240
铁铬钴	-0.03	47.76	1.4	680	51.74
铝镍钴	-0.02	≥ 87.5	≥ 1.15	800	≥ 127.36

在选择永磁体时，需要综合考虑以下几个重要因素：

(1) 合理选择永磁体材料。在永磁调速器正常运转满足工作要求下，尽量减少投入的成本。

(2) 永磁调速器需要应用于不同场景。选取时需要考虑到永磁体材料是否具有良好的环境适用性。

(3) 永磁体需要具有一定的耐高温特性。因为永磁调速器长时间运行会产生涡流损耗，引起温度升高，所以需要避免因高温引起的永磁体退磁效应。

根据表中所示的各种永磁体材料性能以及选取因素得知，钕铁硼永磁体材料能够满足永磁调速器的应用需求。因此，本次实验采用钕铁硼为永磁体原料。

当前市场上，永磁体的常见形状主要有矩形、扇形和圆柱形，由于圆柱形永磁体存在易晃动、磁体利用率低等问题，本次研究将选取范围限定在矩形和扇形之间。如图 2-4 所示，扇形永磁体产生的磁场强度要高于矩形永磁体，然而，扇形永磁体在充磁工艺上难度较大，加工制造也颇具挑战，成本相对高昂，综合各方面因素，本文最终选定矩形作为永磁体结构。

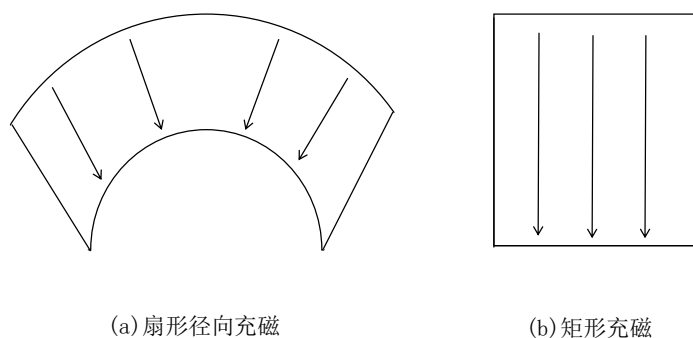


图 2-4 扇形和矩形永磁体充磁模型

2.3.4 移动底座设计

移动底座安装在电机下方，通过移动与输入轴相连导体转子来改变耦合面积，其结构如图 2-5 所示，主要包含伺服电机与移动平台。

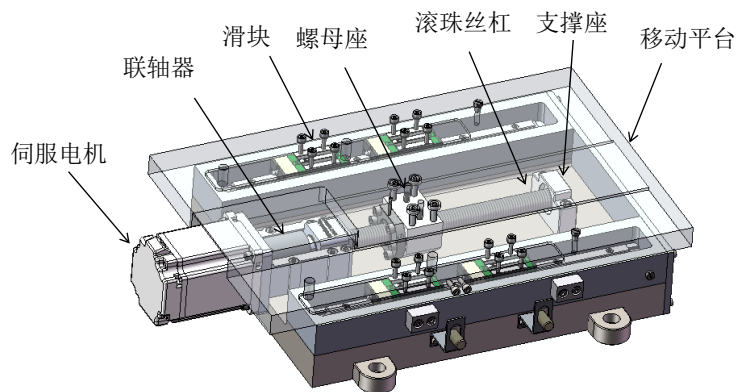


图 2-5 移动底座结构模型

移动平台主要与滑块和螺母座相连，通过滚珠丝杠一起运动，滚珠丝杠的一端与支撑座相连固定在移动底座上，滚珠丝杠的另一端借助联轴器与伺服电机连接，当伺服电机运转时会带动滚珠丝杠旋转，进而推动移动平台做直线运动。通过调控移动平台的位移距离，就能实现对永磁调速器耦合面积的调整，进而调节负载的输出转速。

2.4 Halbach 阵列排布

在永磁调速器的运行机制中，气隙磁通的主磁路构成了其动力核心，为了在不增加永磁体数量的前提下提升调速器的性能，必须着力强化气隙磁通的主磁路，降低漏磁^[48]。传统的 N-S 交替排列方式虽普遍采用，却存在不容忽视的弊端：相邻永磁体间易产生漏磁，导致磁体利用率不高，进而制约了调速器的整体运行效率。

Halbach 阵列是由美国学者 Klaus Halbach 在做实验时发现的，如图 2-6 所示，通过永磁体交替排列，周围磁场方向发生改变，能使磁场集中在一侧以减少漏磁^[49]，相较于 N-S 排列方式，使用 Halbach 阵列能增强磁体所输出的磁力大小，在同样数目的永磁体前提下，能够充分利用永磁转子自身空间，降低使用成本，同时 Halbach 阵列能够充分利用气隙磁场，在传动过程中进一步提升永磁调速器的平稳性^[50]。

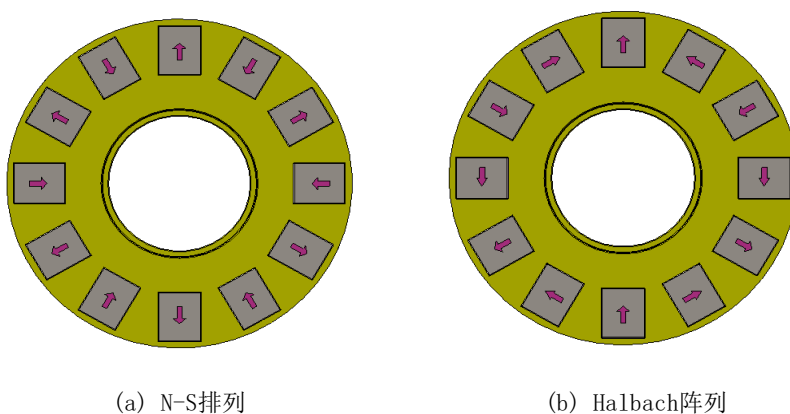


图 2-6 N-S 排列与 Halbach 阵列排布

在 Maxwell 软件中对 N-S 排列和 Halbach 阵列这两种排列方式的永磁体进行静磁场分析，对比两者在气隙磁通中的变化情况，磁力线和磁通变化情况如图 2-7 和 2-8 所示。

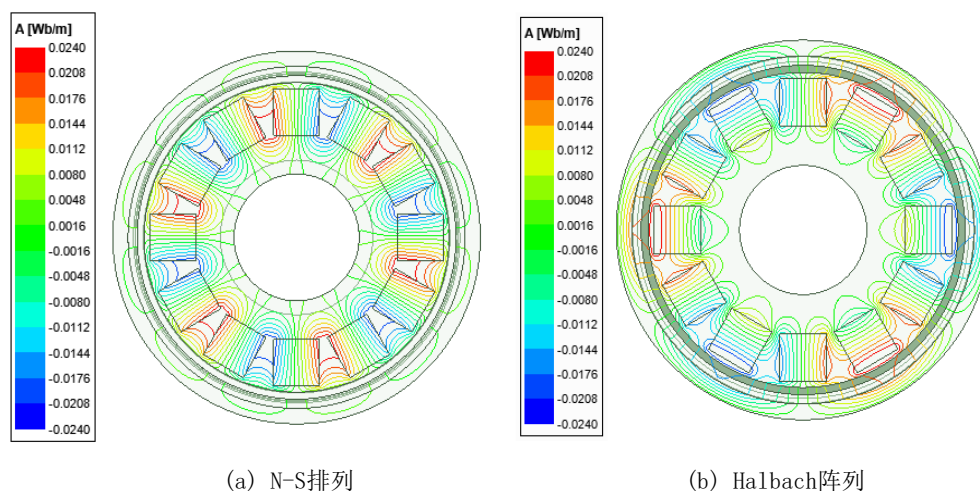


图 2-7 N-S 排列与 Halbach 阵列的磁力线变化

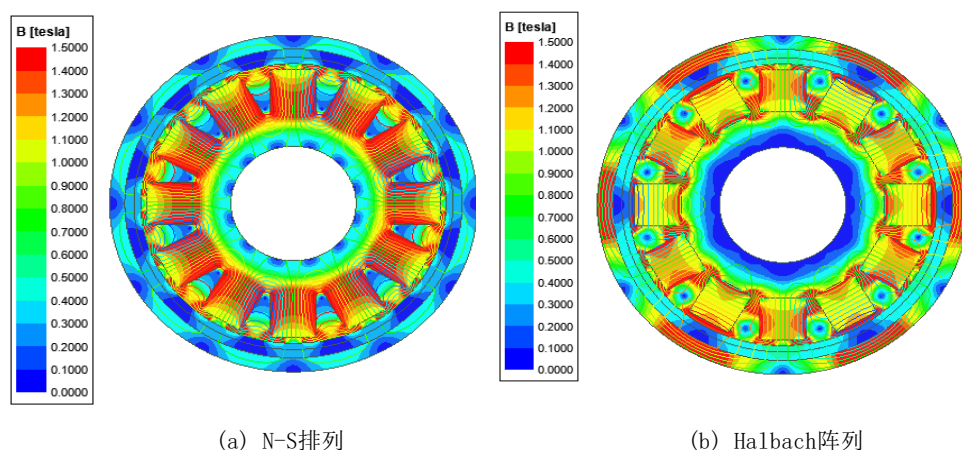


图 2-8 N-S 排列与 Halbach 阵列的磁通变化

永磁体在 N-S 排列方式下, 永磁转子内侧与外侧分布着磁力线, 但永磁转子内侧存在漏磁现象。相比之下, Halbach 阵列方式产生的磁力线主要集中在永磁转子外侧, 内侧的磁力线则较为稀少, 且在永磁转子内侧无漏磁。在永磁转子外侧气隙处所产生的磁力线相较于 N-S 排列所产生的磁力线更为密集, 从而能够更大程度地利用磁场。

考虑到影响永磁调速器传动性能的关键因素主要在于永磁转子外侧的气隙磁通大小。通过在导体与永磁转子之间构建一条圆弧线, 从而掌握气隙处磁场强度的分布特征。借助 Maxwell 的后处理功能, 观察气隙磁通沿圆弧方向的变化规律, 具体情况如图 2-9 所示。

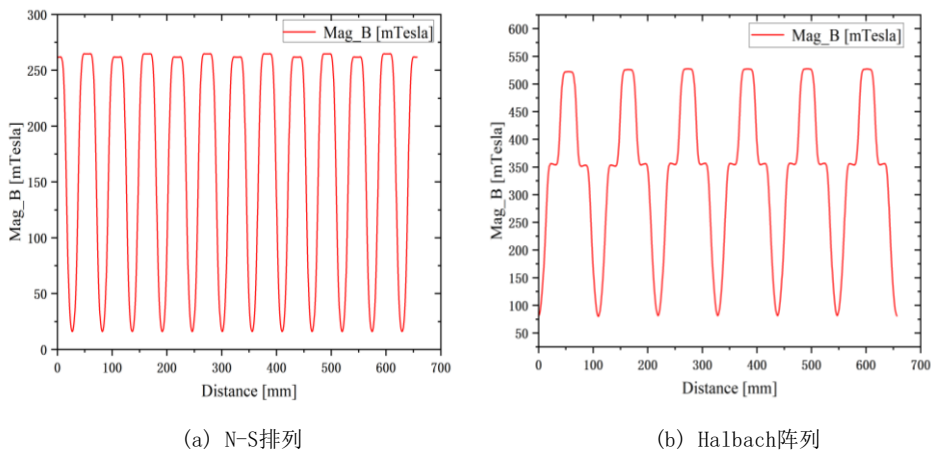


图 2-9 N-S 排列与 Halbach 阵列的气隙磁通变化分布图

为了评估 N-S 排列与 Halbach 阵列的静磁场特性，将气隙处的平均磁通密度作为衡量标准。经测算，N-S 排列时气隙的平均磁通密度为 168.67mTesla，而 Halbach 阵列的气隙平均磁通密度达到 343.57mTesla。由此可见，相较于 N-S 排列方式，Halbach 阵列方式的平均气隙磁通提高了 103.7%，具体参数如表 2-2 所示。

表 2-2 N-S 排列与 Halbach 阵列的气隙磁场特性对比

永磁体排列方式	普通 N-S 排列	Halbach 阵列
最大磁通密度 (mT)	264.86	527.57
平均磁通密度 (mT)	168.67	343.57
平均输出转矩 (N·m)	4.614	9.236

针对 N-S 排列和 Halbach 阵列，在 Maxwel 中对其进行瞬态场分析。两种排列方式下各参数相同，设置转速差为 100rpm、开度为 100%下输出转矩如图 2-10 所示，对比两种永磁体排列方式下所输出的转矩情况。

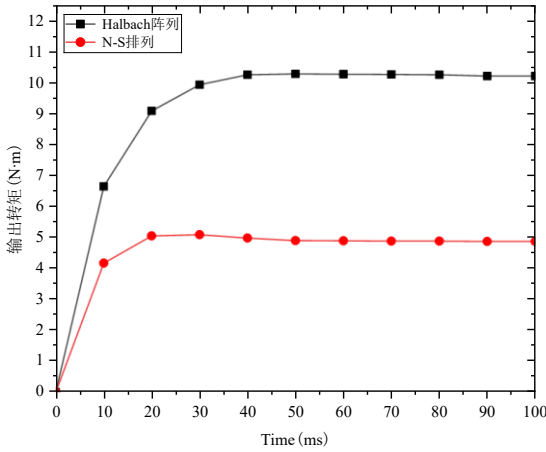


图 2-10 N-S 排列与 Halbach 阵列的输出转矩图

通过对比 N-S 排列和 Halbach 阵列方式下的输出转矩,可以得到在同等条件下, Halbach 阵列能够使永磁调速器获得更大输出转矩。其中 N-S 排列下平均输出转矩为 $4.614\text{N}\cdot\text{m}$, Halbach 阵列下平均输出转矩为 $9.236\text{N}\cdot\text{m}$, Halbach 阵列所输出的转矩相较于 N-S 排列能够提高 100.2%, 故选取 Halbach 阵列为本文永磁体的排列方式。

2.5 永磁调速器的数学模型建立

永磁调速器内部的交变磁场源于导体转子与永磁体间的相互作用,但由于涉及电磁耦合理论,其磁场变化规律的数值求解通常较为复杂,以永磁调速器作为分析对象,目前对于永磁调速器的输出转矩和涡流损耗,仍无法实现精确的解析与计算。为解决这一问题,基于等效磁路法构建永磁调速器的数学模型,可为其传动特性的研究奠定基础,从而深入分析输出转矩与相关参数的作用关系^[51]。

基于磁路与电路的相似特性,等效磁路法将磁场分析转化为类似电路的磁路问题^[52]。为构建精确的等效磁路图,需深入掌握磁场分布规律,将永磁调速器沿径向展开为 2D 模型,由主磁路和漏磁路组成的 Halbach 阵列模型如图 2-11 所示。当导体转子切割垂直于自身的磁感线时才会产生涡流,且主磁路强度与磁感线密度成正比,主磁路强度越高,永磁调速器所输出转矩越大。

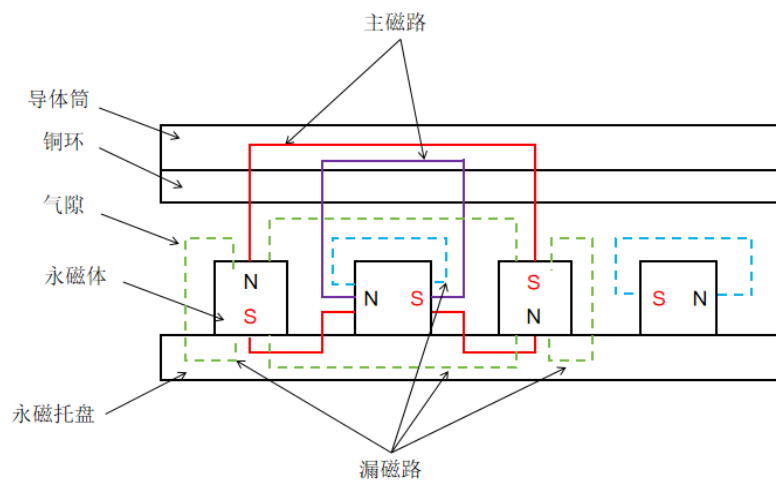


图 2-11 Halbach 阵列等效二维模型图

(一) 主磁路:

(1) 磁力线在主磁路中呈现复杂的闭合路径,磁力线从首块永磁体的 N 极

出发,依次穿越气隙、铜环和导体筒,再经铜环和气隙到达第三块永磁体的 S 极,随后从自身的 N 极发出,穿过托盘和气隙进入第二块永磁体的 S 极,随后从自身的 N 极发出,经过气隙和托盘回到首块永磁体的 S 极。

(2) 磁力线从第二块永磁体的 N 极出发,依次穿过气隙、铜环和导体筒,随后再次经过铜环和气隙,最终到达自身的 S 极。

(二) 漏磁路:

(1) 第一块永磁体具有双磁路路径: 第一条路径中,磁力线从其 N 极出发,穿过气隙和永磁托盘后返回 S 极; 第二条路径中,磁力线从 N 极发出,经气隙到达第三块永磁体的 S 极,随后从第三块的 N 极出发经永磁托盘回到第一块的 S 极。

(2) 第二块永磁体的磁力线从 N 极出发,穿过气隙后回到自身的 S 极。

(3) 第三块永磁体的磁力线从 N 极出发,经过永磁托盘和气隙后返回其自身的 S 极。

(4) 第四块永磁体的磁力线从 N 极出发,穿过气隙后回到其自身的 S 极。

Halbach 阵列的等效磁路示意图如图 2-12 所示,各参数对应的物理意义如表 2-3 所示。

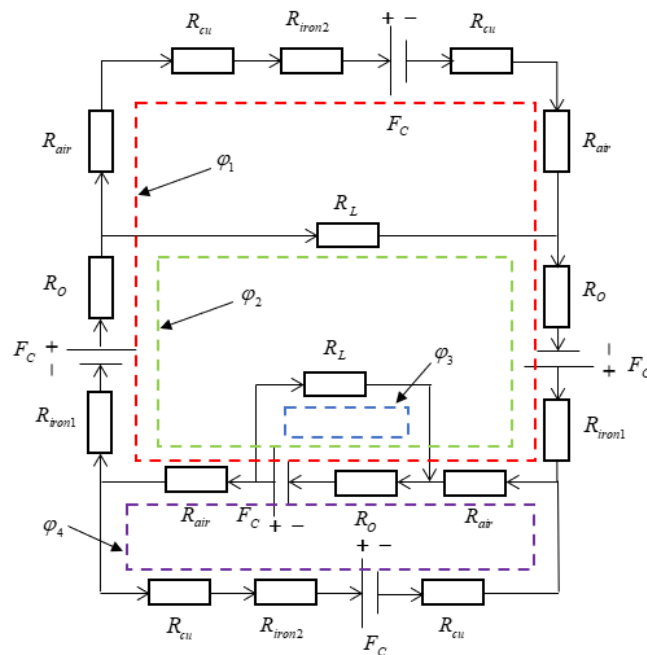


图 2-12 Halbach 阵列等效磁路模型图

表 2-3 Halbach 磁路符号

R_{air}	气隙磁阻	R_{iron1}	永磁托盘磁阻
R_{cu}	铜环磁阻	R_{iron2}	导体筒磁阻
R_0	永磁体磁阻	R_L	永磁体之间的漏磁阻
F_c	永磁体产生的磁动势	φ	磁通

将永磁体简化为磁动势与内阻串联的等效模型,可推导出单个永磁体的磁动势表达式为:

$$F_c = H_c L_0 \quad (2-1)$$

式中, H_c 为永磁体的矫顽力, L_0 为永磁体的厚度。

由磁路欧姆定律可得:

$$R = \frac{L}{\mu S} \quad (2-2)$$

式中, L 为磁路的厚度, μ 为材料的磁导率, S 为磁路的横截面积。

故可以推导出各元件的磁阻为:

$$R_0 = \frac{L_0}{\mu_0 S_0} \quad (2-3)$$

$$R_{air} = \frac{L_{air}}{\mu_{air} S_0} \quad (2-4)$$

$$R_{cu} = \frac{L_{cu}}{\mu_{cu} S_0} \quad (2-5)$$

$$R_{iron1} = \frac{L_{iron1}}{\mu_{iron1} S_0} \quad (2-6)$$

$$R_{iron2} = \frac{L_{iron2}}{\mu_{iron2} S_0} \quad (2-7)$$

其中, L_{air} 为气隙厚度, L_{cu} 为铜环厚度, L_{iron1} 为永磁托盘厚度, L_{iron2} 为导体筒厚度; μ_0 为永磁体相对磁导率、 μ_{air} 为气隙相对磁导率、 μ_{cu} 为铜环相对磁导率、 μ_{iron1} 为永磁托盘相对磁导率、 μ_{iron2} 为导体筒相对磁导率; S_0 为等效区域沿径向方向截面计算面积。

气隙内的磁感应强度为：

$$\mathbf{B} = \frac{\Phi}{S_0} \quad (2-8)$$

由磁通量 Φ 变化可得：

$$\Phi = BS_0 \cos(\omega \cdot t) \quad (2-9)$$

$$\omega = \frac{2\pi n N_p}{60} \quad (2-10)$$

式中 t 为时间， ω 为磁场变化角速度， N_p 为磁极对数， n 为转速差。

依据电磁感应定律可得^[53]：

$$\varphi_e = \left| \frac{d\varphi}{dt} \right| = B\omega S_0 \sin(\omega \cdot t) \quad (2-11)$$

趋肤深度可用如下表达式进行描述：

$$\Delta h = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu_{cu}}} \quad (2-12)$$

式中 σ 为铜环电导率，铜环的电阻率为：

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (2-13)$$

铜环上的感应涡流电阻为：

$$dR = \rho \frac{2\pi r}{\Delta h dr} \quad (2-14)$$

铜环上感应涡电流的截面积为：

$$S_0 = \pi r^2 \quad (2-15)$$

r 为铜环感应涡流半径，故铜环感应涡电流为：

$$di = \frac{\varphi_e}{dR} = \frac{B\omega\Delta h \sin(\omega t)}{2\rho} r dr \quad (2-16)$$

单个感应涡流的损耗功率 P 为：

$$dP = \frac{\varphi_e^2}{dR} = \frac{B^2 \pi r^3 \omega^2 \sin^2(\omega t)}{2\rho} \Delta h dr \quad (2-17)$$

铜环涡流区域的损耗功率为：

$$P = \int_0^r dP = \frac{B^2 \pi r^4 \omega^2 \sin^2(\omega t) \Delta h}{8\rho} \quad (2-18)$$

铜环在一个周期中的平均涡流损耗功率为：

$$P_{\text{Loss}} = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot B^2 \cdot \omega^2 \cdot \Delta h}{16 \cdot \rho} \quad (2-19)$$

铜环涡流损耗总功率为^[54]：

$$P_{\text{Loss}} = \frac{n \cdot \pi \cdot r^4 \cdot B^2 \cdot \omega^2 \cdot \Delta h}{16 \cdot \rho} \quad (2-20)$$

$$P_{\text{Loss}} = T_s (\omega_1 - \omega_2) \quad (2-21)$$

其中 k 为永磁体块数，故输出转矩为：

$$T_s = \frac{P_{\text{Loss}}}{(\omega_1 - \omega_2)} = \frac{k \cdot \pi \cdot r^4 \cdot B^2 \cdot (\omega_1 - \omega_2) \cdot \Delta h}{16 \cdot \rho} \quad (2-22)$$

由上式可知，永磁调速器输出转矩 T_s 与转速差、磁感应强度和铜环厚度有关，在其他参数不变时，其传动能力主要与转速差、不同开度（即等效区域沿径向方向截面积）、铜环厚度有关。

2.6 本章小结

本章详细阐述了永磁调速器的组成及工作原理，对导体和永磁转子、永磁体、移动底座进行结构设计，由于钕铁硼永磁体具备良好的工作特性，因此将其选定为永磁体材料。随后，对不同永磁体排列方式展开了对比分析，相较于普通 N-S 排列，Halbach 阵列在同等情况下，可使气隙磁通密度和输出转矩提升一倍。通过等效磁路法对 Halbach 阵列下永磁调速器进行数学建模，推导永磁调速器的输出转矩公式，确定了永磁调速器的传动能力主要与转速差、不同开度、铜环厚度有关。

第3章 永磁调速器传动特性研究

3.1 引言

在工业生产过程中，负载设备的调速需求可以通过永磁调速器得以实现。本文以一台 5.5kW 的离心泵为研究样本，构建永磁调速器的三维简化模型，并导入到 Maxwell 软件中进行分析。对其瞬态磁场展开深入研究，着重对 Halbach 阵列形式下的永磁调速器进行剖析，研究在不同条件下转速差、开度和铜环厚度对输出特性变化的具体情况。

3.2 麦克斯韦方程组

为探索不同工况下各影响因素与输出转矩之间关系，在进行分析时，通常借助 Maxwell 软件开展研究，采用有限元离散方法，在三维瞬态分析中将电磁场问题简化为矩阵求解^[55]，可通过麦克斯韦方程组表示为：

$$\begin{cases} \nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \\ \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \cdot B = 0 \\ \nabla \cdot D = \rho \end{cases} \quad (3-1)$$

式中： ∇ 为矢量算子， H 为磁场强度， B 为磁通密度， J 为电流密度， D 为电通密度， E 为电场强度， ρ 为自由电荷密度。

其中磁场强度与磁通密度关系为^[55]：

$$\begin{cases} D = \varepsilon E \\ J = \sigma E \\ B = \mu H \end{cases} \quad (3-2)$$

式中： ε 、 σ 、 μ 分别为介电常数、材料电导率、材料磁导率。

在工作过程中，由于无位移电流，即电通密度 $D=0$ ，即：

$$\begin{cases} \nabla \times \frac{1}{\sigma} \nabla \times H + \frac{\partial B}{\partial t} = 0 \\ \nabla \cdot B = 0 \end{cases} \quad (3-3)$$

用矢量磁势表达为:

$$B = \nabla \cdot A \quad (3-4)$$

式中 A 为磁感应强度。

永磁调速器导体的电流密度为:

$$J = J_s + J_v + J_e \quad (3-5)$$

式中 J_s 为变化磁场产生的电流密度, J_v 为标量产生的电流密度, J_e 为速度电流密度。

永磁调速器的导体区 Ω_1 , 永磁体区 Ω_2 , 空气区、轭铁区 Ω_3 , 其关系式为:

$$\begin{cases} \Omega_1 : \nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times A) = \sigma \left(-\frac{\partial A}{\partial t} + v \times \nabla \times A \right) \\ \Omega_2 : \nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times A - B_r) = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} \\ \Omega_3 : \nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times A) = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} \end{cases} \quad (3-6)$$

式中: v 为导体相对运动速度, σ 为电导率, B_r 为永磁体剩磁。

输出转矩为:

$$T = \frac{1}{2} \int \left[\int_{r_1}^{r_2} (J_e \times B) dr \right] dv \quad (3-7)$$

式中: v 为速度, r_1 、 r_2 为导体转子内外半径。

3.3 永磁调速器有限元模型建立

3.3.1 有限元分析法介绍

有限元分析法作为一种数值计算方法^[56], 其核心思想是将求解区域离散化为若干个称为“单元”的子区域, 这些单元的子区域在满足特定边界条件下, 通过求解各自区域的近似解, 最终融合形成整个区域的数值解^[57]。

随着计算机技术的快速发展, 有限元分析法的计算效率得到显著提升, 不仅能缩短大规模重复运算的时间^[58], 还能促进有限元分析法在多学科领域的深度融合^[59]。本文为简化求解计算过程, 采用 Maxwell 有限元分析软件以解决相关问题^[60], 该软件集成了麦克斯韦方程组, 能够对模型进行精确计算, 从而获得直

观可靠的有限元分析结果。

3.3.2 基本假设

在构建有限元分析模型前，为使分析过程更为流畅，需先对模型进行简化处理，具体假设条件如下：

（1）假设永磁体在充磁方向上均匀充磁，并且零部件的材料在各个方向上都具有相同的物理性质。

（2）假设在进行仿真的过程只考虑主要零部件，忽略永磁调速器中的螺钉孔、加工圆角、凹槽等几何特征，考虑到输入轴与输出轴对仿真结果没有影响，在建模时可对其进行去除。

（3）在永磁调速器运行过程中，假设转速差保持恒定，导体转子与永磁转子均不发生弹性变形或位移，且两者间的气隙厚度始终保持不变。

（4）假设永磁调速器运行时，由于涡流效应，温度对分析结果不发生影响，永磁体不会因为涡流效应而发生退磁效应。

3.3.3 有限元模型建立

本文针对永磁调速器的传动特性展开深入分析，样机核心组件包含永磁体、导体筒、铜环及永磁托盘，其具体结构参数如表 3-1 所示。基于 SolidWorks 建模软件构建了永磁调速器的三维简化模型，并将该模型导入 Maxwell 软件进行仿真分析，为确保分析结果的可靠性，在导体转子内侧构建了棱柱型空气域，如图 3-1 所示，并将其设置为 Band 域，使其完全包裹永磁转子，为后续传动特性研究提供精确的仿真基础。

表 3-1 样机尺寸参数

零部件名称	参数	参数值（mm）	材料名称
永磁体	长×宽×高	60×30×25	钕铁硼
	内径	209	
铜环	外径	221	铜
	径向长度	60	
永磁托盘	内径	84	钢
	外径	200	
	径向长度	60	
导体筒	内径	221	钢
	外径	241	
	径向长度	60	

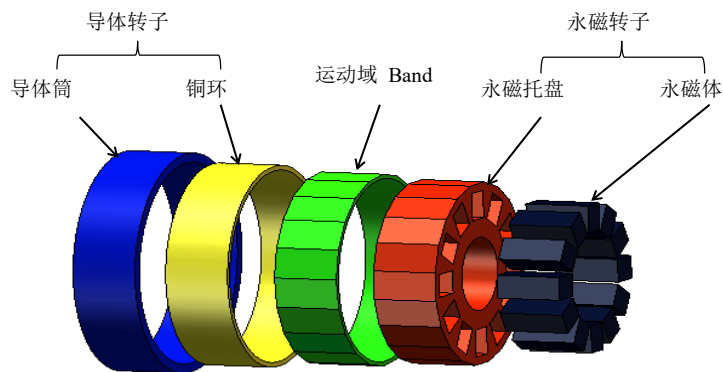


图 3-1 有限元模型图

由于 Maxwell 3D 模式下瞬态求解器中的 Band 域不能含有任何弧线，因此该 Band 域为棱柱多边形，需要包含永磁转子且不能与导体转子相交，并且 Band 域不作为分析零件。

3.3.4 材料属性设定

几何模型建立后，对零部件材料进行设置，Maxwell 软件内置了丰富的常用数据库，可直接调用现有材料参数。当内置材料无法满足特定设计需求或所需材料缺失时，可利用软件的材料管理功能自定义新材料。通过输入相关物理特性参数创建新材料，并储存至数据库中以供后续使用，具体材料参数见表 3-2 所示。

表 3-2 各零部件材料参数

零部件名称	材料名称	相对磁导率	电阻率	矫顽力
永磁体	N48SH	1.47	625000	-890
铜环	Copper	0.99	58000000	0
Band	Air	1	0	0
Region 区域	Vacuum	1	0	0
导体筒	Steel-1008	696.3	2000000	0
永磁托盘	Steel-1008	696.3	2000000	0

3.3.5 基本参数设置

(1) 边界条件

在完成模型搭建与材料属性设定工作后，需要根据设定的情况选取磁场边界条件。因为永磁体磁通呈现沿径向分布的特性，最外侧导体筒和最内侧永磁托盘设置了磁轭参数，不会进入磁饱和状态。极大程度上阻碍了磁通穿过磁轭，从而有效避免了漏磁现象的发生，所以本次分析无需额外设置边界条件。

（2）激励条件添加

在有限元分析中，选用铜环作为被动激励源，因其自身特性，通过切割磁感线产生感应涡流，故无需额外配备电流。在开展仿真之前，需将铜环里的涡流设定为被动激励源，确保整个分析过程符合基本原理和实际工况。

（3）网格划分

在有限元分析中，永磁体产生的磁感线对输出转矩具有决定性影响。所以，设置永磁体网格最大尺寸为 4mm，铜环网格最大尺寸为 5mm，考虑到网格划分太小会影响计算时间，设置导体转子和永磁托盘为 12mm。由于模型规则无凹凸形状，所以网格多为四面体且分布均匀，如图 3-2 所示。

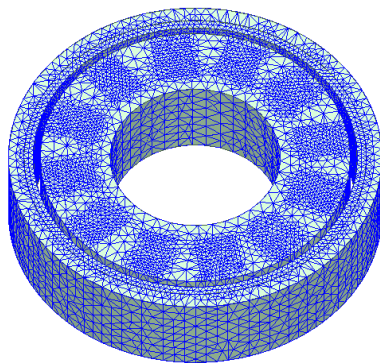


图 3-2 网格划分

（4）设置求解参数

网格划分完成后，需确定仿真求解的步长。求解过程中，结果需经过多次迭代才能趋于稳定，步长的设置对此有重要影响，步长越短，结果精度越高，但计算时间也会显著增加。因此在设置步长时，需要综合考虑计算机的硬件条件，本次仿真设定求解时间为 100ms，步长设置为 10ms。

3.4 不同转速差下的传动特性

评判传动设备性能的关键参数是输出转矩，通过建立输出转矩数学模型推导出输出转矩与转速差有关。为研究永磁调速器在不同转速差下的传动特性，采用 Maxwell 软件进行分析。由于软件限制无法同时设置两个旋转部件，因此设定永磁转子相对于导体转子以特定转速差旋转，以确保两者之间存在相对运动，从而实现对永磁调速器传动特性的有效研究^[61]。

通过对两者之间的转速差进行参数化建模，如图 3-3 所示，以 60rpm 为起

点，500rpm 为终点，设定间隔 40rpm，对转速差进行参数化仿真。在完成永磁调速器的仿真计算后，进入后处理环节，得到其在不同工况下的平均输出转矩值。具体数据如表 3-3 所示，通过 Origin 软件拟合出在不同开度时，输出转矩与转速差的关系曲线，如图 3-4 所示。

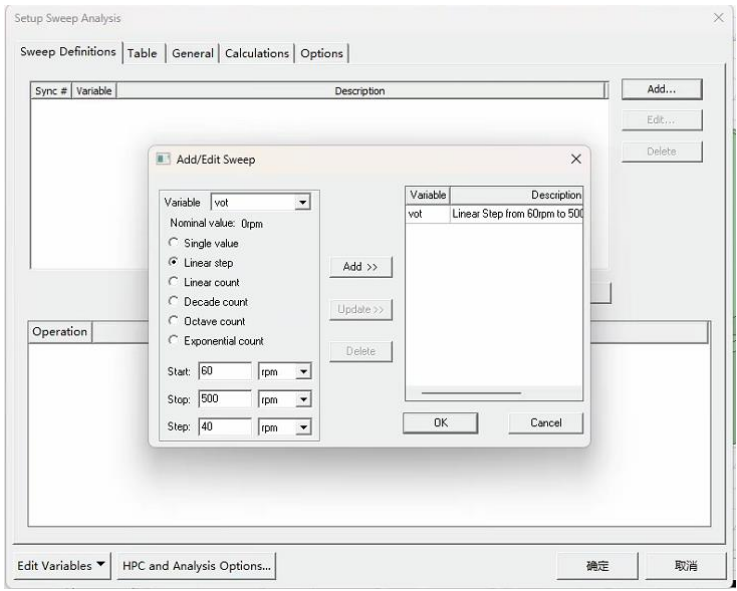


图 3-3 参数化建模

表 3-3 不同转速差下的输出转矩（N·m）

转速差（rpm）	25%开度	50%开度	75%开度	100%开度
60	1.932	4.767	7.510	8.389
100	3.012	7.314	11.421	12.782
140	3.843	8.770	14.166	15.893
180	4.529	9.620	15.811	17.782
220	5.327	9.842	16.542	18.626
260	6.038	9.944	16.583	18.705
300	5.896	9.475	16.220	18.316
340	5.410	8.968	15.639	17.714
380	5.033	8.349	15.056	17.134
420	4.902	7.674	14.516	16.569
460	4.730	7.017	13.779	15.794
500	4.451	6.346	12.775	14.670

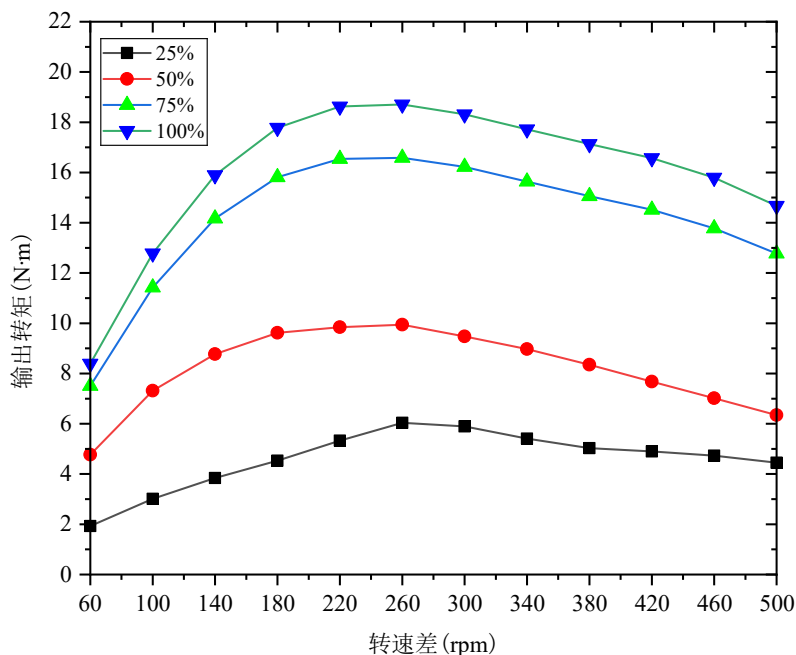


图 3-4 不同转速差下的输出转矩曲线

通过对比不同工况下的平均输出转矩，结合相关图表可以发现：当永磁调速器开度恒定时，输出转矩随转速差的增大呈现先升后降的趋势。这是由于转速差的增加导致磁场变化频率加快，根据电磁感应定律，磁感线切割产生的感应涡流随之增强，进而强化感应磁场，推动输出转矩上升。然而，当转矩达到峰值后开始下降，这是因为感应磁场始终阻碍原磁场，随着感应磁场的持续增强，原磁场被削弱，导致输出转矩减小。同时，转速差增大过程中损耗功率持续上升，进一步促使输出转矩在达到峰值后下降。

在相同转速差条件下，平均输出转矩随开度的增加而增大，开度的增加扩大了有效耦合面积，导致磁感应密度上升，从而增加感应涡流，推动输出转矩持续增加。此外，当转速差达到 260rpm 时，无论开度为 25%、50%、75%还是 100%，永磁调速器的输出转矩均达到峰值。其数值分别为 $6.038\text{N}\cdot\text{m}$ 、 $9.944\text{N}\cdot\text{m}$ 、 $16.583\text{N}\cdot\text{m}$ 和 $18.705\text{N}\cdot\text{m}$ 。

在永磁调速器运行中，铜环表面的感应涡流具有双重作用：一方面，感应涡流生成感应磁场，与原磁场相互作用实现转矩传递；另一方面，感应涡流会导致涡流损耗并产生热量，可能影响调速器的正常运行。实际上，永磁调速器的主要功率损耗源于感应涡流，通过 Maxwell 软件的后处理功能，可以计算调速器在特定工况下的功率损耗，如表 3-4 所示，通过 Origin 软件拟合出在不同工况下功率

损耗曲线，如图 3-5 所示。

表 3-4 不同工况下损耗功率 (W)

转速差 (rpm)	25%开度	50%开度	75%开度	100%开度
60	11.8	28.7	44.6	49.9
100	30.9	73.4	114.6	128.5
140	56.1	127.8	202.3	227.5
180	84.7	184.6	295.2	333.7
220	114.7	239.7	381.7	436.9
260	144.2	289.7	469.3	507.0
300	165.7	333.6	541.4	613.8
340	188.1	371.3	602.4	684.8
380	201.7	403.8	654.8	732.2
420	222.9	430.7	702.8	776.4
460	243.9	454.2	746.4	824.2
500	262.4	474.0	785.2	900.7

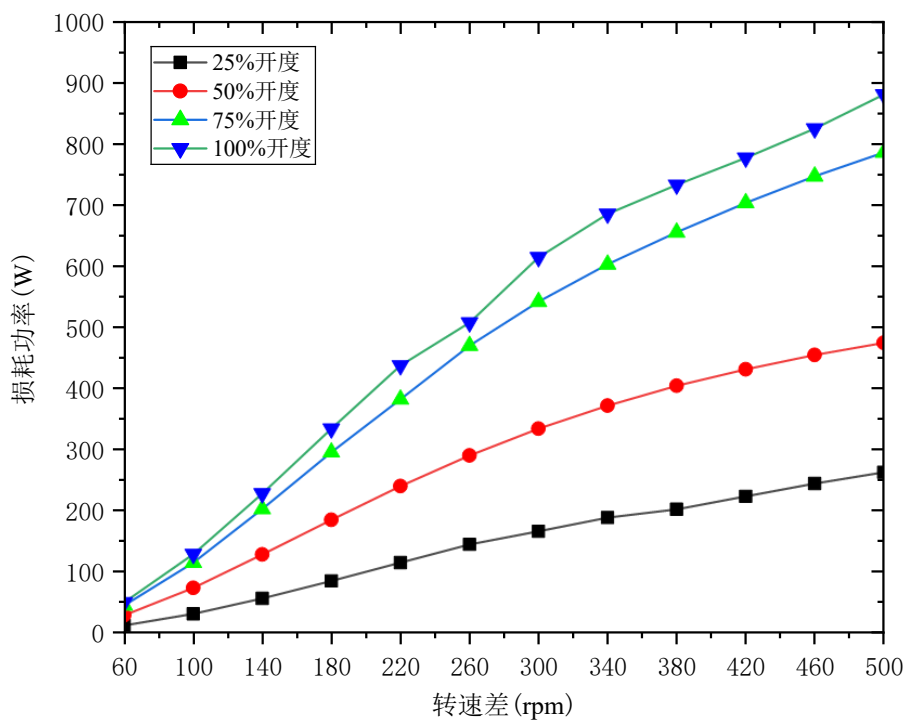


图 3-5 不同工况下的损耗功率曲线

从图 3-5 中可以看出，当转速差恒定时，永磁调速器的损耗功率随开度的增大而增加；而在开度不变的情况下，损耗功率随转速差的增大而逐步上升。以转速差为 260rpm、开度为 100%工况下的铜环为例，其涡电流分布情况如图 3-6 所示，铜环表面的电流密度最大值可达 $2.7 \times 10^7 A/m^2$ ，涡电流在铜环的端部和中心区域表现得尤为显著。

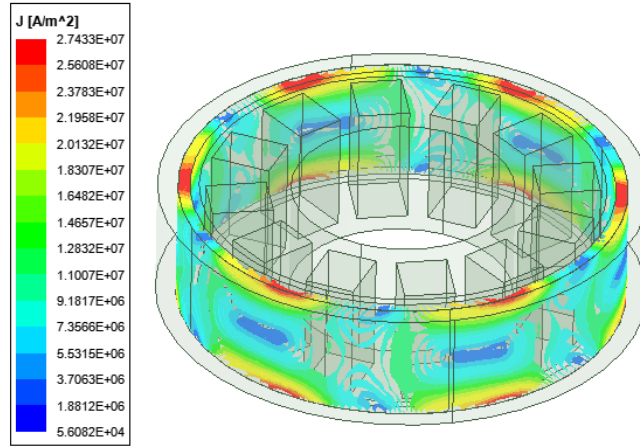


图 3-6 铜环涡电流分布图

在永磁调速器运行过程中，由于导体转子与永磁转子之间的相对运动，感应涡流在铜环上生成，进而引发涡流损耗。如图 3-7 所示为转速差为 260rpm、开度为 100%工况下铜环的欧姆损耗分布情况，其分布特征与前述电流密度分布相吻合，其中最大涡流密度集中出现在铜环的中心区域和端部位置。

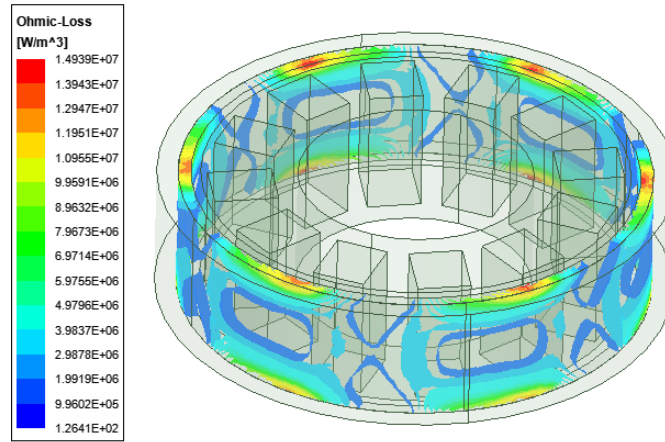


图 3-7 铜环欧姆损耗分布图

永磁调速器是恒转矩传递设备，若 T_1 为输入转矩， T_2 为输出转矩，则有：

$$T_1 = T_2 \quad (3-8)$$

永磁调速器的传递效率为：

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{T_2 n_2 / 9.55}{T_1 n_1 / 9.55} = \frac{n_2}{n_1} = 1 - s \quad (3-9)$$

式中： P_1 为永磁调速器的输入功率， P_2 为永磁调速器的输出功率，单位为 W ，

n_1 、 n_2 为导体转子和永磁转子转速，单位为 $r/\min$ ， s 为转差率。

涡流的损耗功率为：

$$\Delta P = \int_V \rho |J|^2 dV \quad (3-10)$$

式中： ρ 为电阻率。

损耗功率 ΔP 和输入功率 P_1 关系为：

$$P_1 = \frac{\Delta P}{1-\eta} = \frac{\Delta P}{s} \quad (3-11)$$

输出功率 P_2 和输出转矩 T_2 关系为：

$$P_2 = P_1 \eta = \frac{\Delta P(1-s)}{s} \quad (3-12)$$

$$T_2 = \frac{9.55 P_2}{n_2} = \frac{9.55 \Delta P(1-s)}{s \cdot n_1(1-s)} = \frac{9.55 \Delta P}{s \cdot n_1} \quad (3-13)$$

基于上述涡流损耗功率数值及式（3-12），可以推导出永磁调速器在不同工况下的输出功率，如表 3-5 所示。利用 Origin 软件拟合，得到不同工况下输出功率与转速差的关系曲线，如图 3-8 所示。

表 3-5 不同工况下输出功率（W）

转速差（rpm）	25%开度	50%开度	75%开度	100%开度
60	558.5	1359.6	2111.1	2364.2
100	872.6	2073.6	3236.3	3628.1
140	1116.0	2541.3	4024.3	4525.7
180	1291.7	2814.7	4501.8	5088.5
220	1410.3	2947.3	4693.2	5372.3
260	1478.1	2968.9	4810.3	5444.8
300	1449.9	2919.3	4737.3	5370.4
340	1430.1	2823.0	4580.0	5206.5
380	1350.9	2704.2	4385.4	4903.8
420	1329.4	2569.0	4191.7	4630.7
460	1307.0	2433.9	3999.7	4416.6
500	1272.6	2298.8	3808.2	4268.5

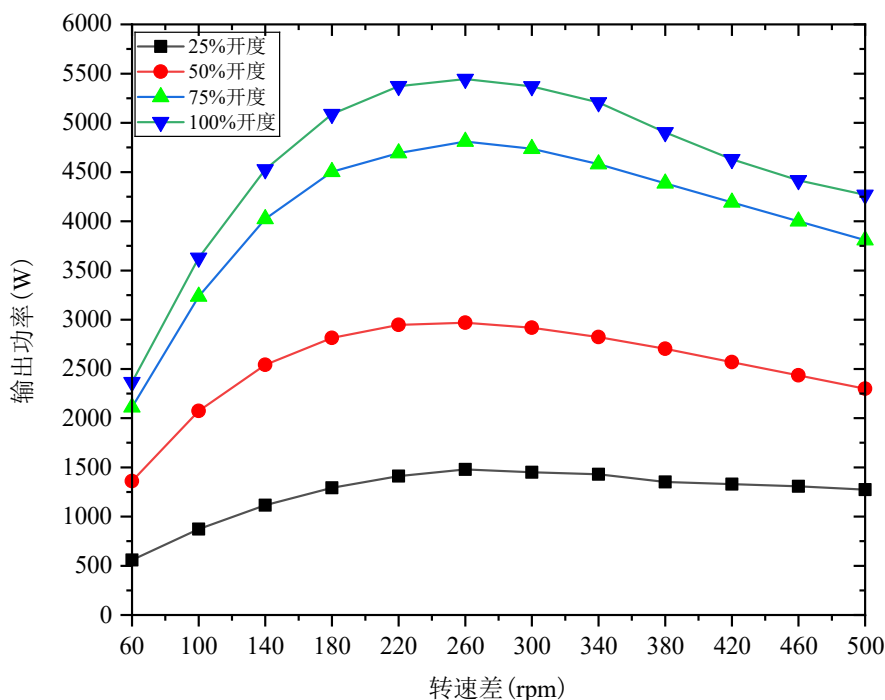


图 3-8 不同工况下输出功率曲线图

从图中可以看出,输出功率随转速差的增加呈现先上升后下降的趋势。当转速差增大时,铜环中的感应涡流和感应磁场逐渐增强,与原磁场相互作用,耦合力增大,从而推动输出功率上升。然而,感应磁场对原磁场的削弱作用会随着转速差的进一步增大而逐渐显现,当感应磁场达到一定强度时,耦合力开始减弱,同时转速差的持续增加会导致损耗功率显著上升,最终使输出功率下降。当永磁调速器开度保持一定时,转速差达到 260rpm 输出转矩达到峰值,对应的峰值分别为 1478.1W、2968.9W、4810.3W 和 5444.8W。

3.5 不同开度下的传动特性

为研究永磁调速器在不同开度下的传动特性,采用 Maxwell 软件进行仿真分析,在转速差固定为 100rpm 的条件下,对 25%、50%、75%和 100%四种开度工况进行了对比研究。当转速差保持不变时,不同开度下的磁通密度分布呈现明显变化,具体表现为:

(1) 25%开度: 如图 3-9 所示,铜环的最大磁通密度主要分布在端部区域。

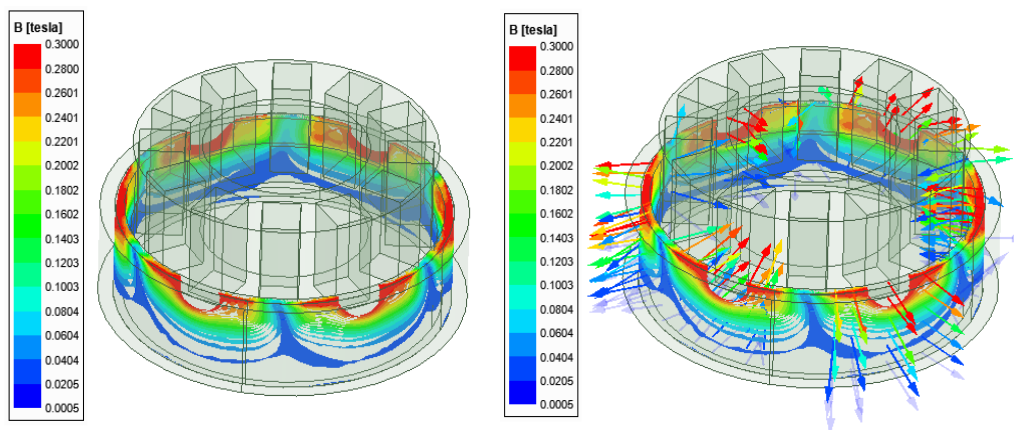


图 3-9 铜环在 25%开度下磁密及矢量分布图

(2) 50%开度: 如图 3-10 所示, 最大磁通密度仍以端部为主, 但开始向中心区域扩散。

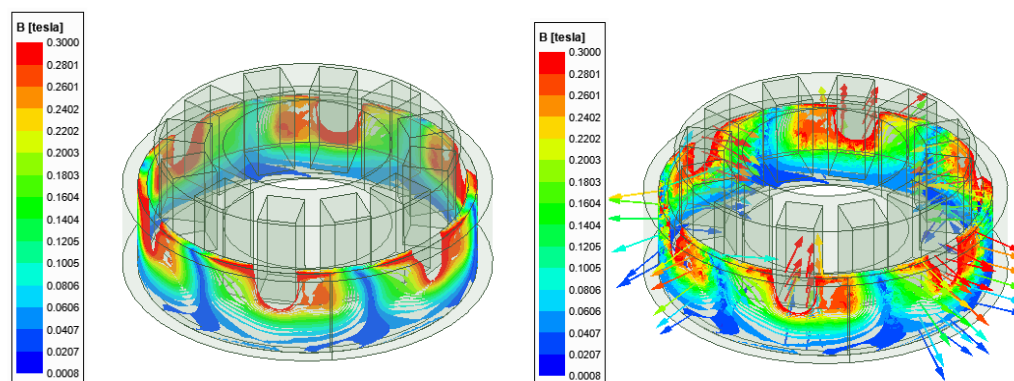


图 3-10 铜环在 50%开度下磁密及矢量分布图

(3) 75%开度: 如图 3-11 所示, 最大磁通密度逐渐向端部和中心区域集中, 分布趋于均匀。

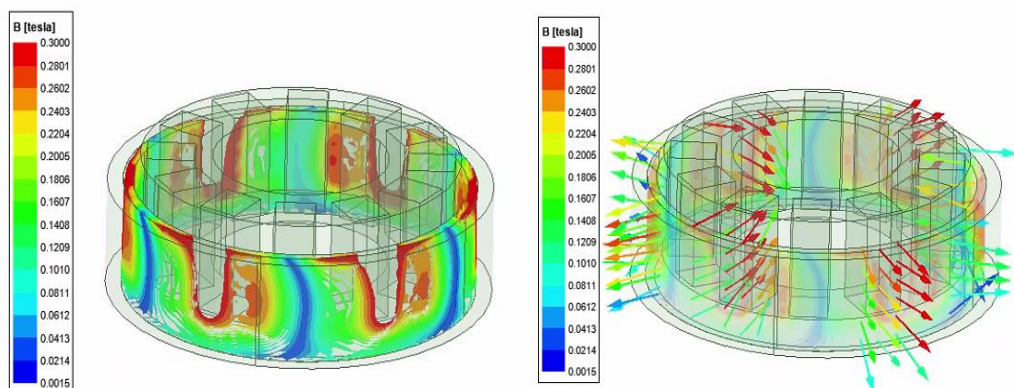


图 3-11 铜环在 75%开度下磁密及矢量分布图

(4) 100%开度: 如图 3-12 所示, 最大磁通密度集中在端部和中心部位, 且

沿径向由内向外逐渐减小。

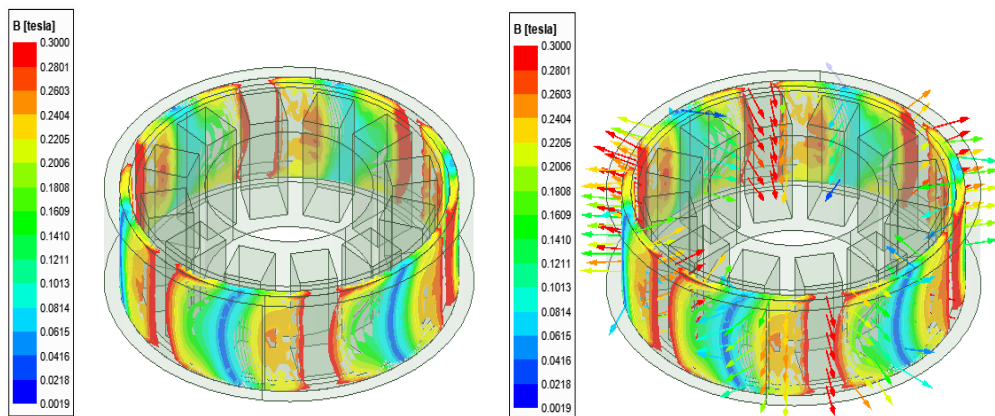


图 3-12 铜环在 100%开度下磁密及矢量分布图

结果表明，随着开度的增加，磁通密度分布从端部逐渐向中心扩展，最终在 100%开度下形成端部和中心区域的双重集中分布。

设定永磁调速器仿真时长为 100ms，在始终保持转速差恒定的情形下，永磁调速器的输出转矩会因开度的不同而有所变化，如图 3-13 所示，在 25%开度时，平均输出转矩为 $3.012\text{N} \cdot \text{m}$ ；当开度提升至 50%时，平均输出转矩增长至 $7.341\text{N} \cdot \text{m}$ ；当开度提升至 75%时，平均输出转矩 $11.421\text{N} \cdot \text{m}$ ；而当开度达到 100%时，平均输出转矩达到了 $12.782\text{N} \cdot \text{m}$ 。100%开度较于 75%开度输出转矩提升了 10.6%，相较于 50%开度输出转矩提高了 42.8%，相较于 25%开度输出转矩更是大幅提高了 76.4%。

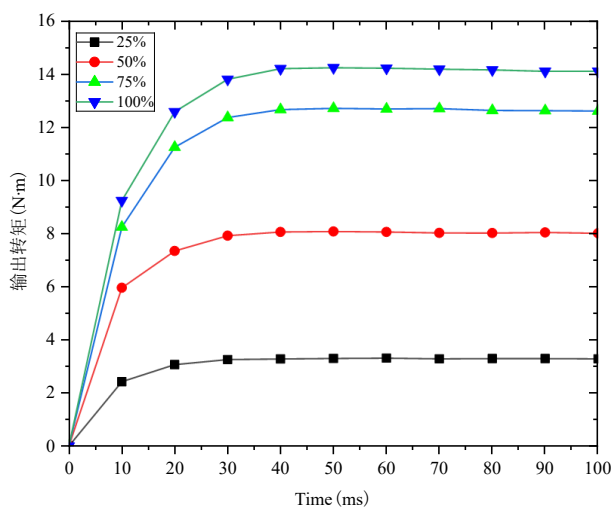


图 3-13 不同开度下输出转矩图

3.6 不同铜环厚度下的传动特性

在永磁调速器的传动过程中，感应涡流通过铜环切割磁感应线产生，进而实现转矩传递，由于铜环厚度的变化会影响其电阻特性，因此有必要对铜环厚度进行详细分析。

设定转速差为 100rpm，对比分析铜环在 3mm、4mm、5mm、6mm 厚度下的输出转矩，如图 3-14 所示。在相同工况下，输出转矩随着厚度的增加随之增强，这是因为铜环厚度增加，在相同条件下切割磁感线的数量增多，感应磁场强度增强，从而推动输出转矩不断提升。

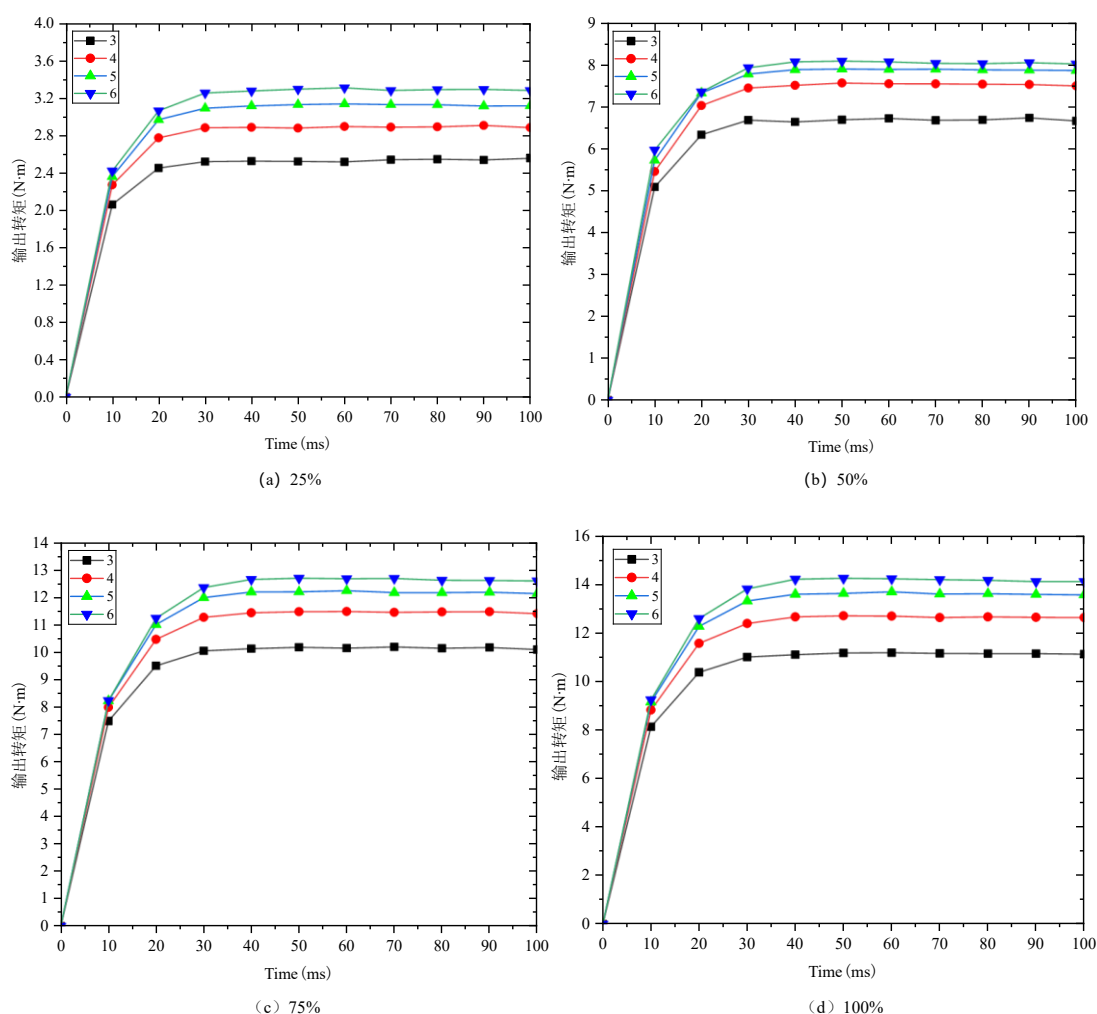


图 3-14 不同铜环厚度输出转矩曲线图

不同铜环厚度平均输出转矩如表 3-6 所示，在 100%开度下，6mm 铜环厚度相较于 3mm、4mm 及 5mm 铜环厚度分别提高了 20.25%、10%、3.61%；在 75%开度下，6mm 铜环厚度相比 3mm、4mm 及 5mm 铜环厚度分别提高了 18.46%、

8.65%、3.18%；在 50%开度下，6mm 铜环厚度相比于 3mm、4mm 及 5mm 铜环厚度分别提高了 15.93%、5.91%、1.57%；在 25%开度下，6mm 铜环厚度相比于 3mm、4mm 及 5mm 铜环厚度分别提高了 21.98%、11.29%、4.62%。

表 3-6 不同铜环厚度下平均输出转矩表 (N·m)

铜环厚度 (mm)	25%开度	50%开度	75%开度	100%开度
3	2.35	6.149	9.313	10.194
4	2.672	6.882	10.433	11.504
5	2.873	7.199	11.058	12.32
6	3.012	7.314	11.421	12.782

随着铜环厚度的增加，输出转矩提升逐渐下降。这是由于铜环厚度超过一定限度，径向磁路的长度也会相应增长，磁阻也会增大，穿过铜环作用于导体转子的磁场强度有所下降，输出转矩提升逐渐下降，故选取 6mm 铜环厚度为本实验铜环厚度。

3.7 本章小结

本章运用有限元方法对永磁调速器的三维磁场展开分析，在 SolidWorks 中构建三维模型简化并导入到仿真软件进行分析，各零部件的材料与基本参数在软件中进行设定，对其展开瞬态磁场研究。研究表明，永磁调速器的输出转矩受多种因素影响，在相同开度条件下，输出转矩随转速差的增大呈先升后降的趋势，并在 260rpm 转速差时出现峰值；当保持转速差不变时，输出转矩与开度大小成正比关系，开度越大，转矩越强；就铜环厚度而言，随着铜环厚度增加，感应涡流效应增强，输出转矩不断增大。通过系统研究不同工况下的输出特性，所得结论对实际生产具有重要的指导意义。

第 4 章 永磁调速器在泵站系统上的应用

4.1 引言

本章将永磁调速器应用于泵站系统中，建立循环水厂泵站系统的三维模型并加工实物样机。在之前的章节中，主要通过理论或有限元仿真分析采用 Halbach 阵列的永磁调速器传动特性。为了充分掌握在实际情况下的传动特性，需要制造出实物样机，以导体转子与永磁转子作为研究对象，对永磁调速器样机进行性能测试，将实验数据与数值模拟结果进行对比验证，全方位评价永磁调速器运行特性。

4.2 循环水厂泵站系统样机的设计与搭建

4.2.1 建模过程

本课题研究的永磁调速器属于调速设备，为测试其能否替代传统阀门作用，设计出一款同时具备永磁调速器和阀门调节的循环水厂泵站系统，该泵站系统具备以下几个特点：

（1）每台离心泵所配备的永磁调速器由独立的伺服电机控制，伺服电机控制移动平台移动来调节永磁调速器的耦合面积，从而控制离心泵的输出转速。

（2）每台离心泵的出口配有流量计、压力表、电动调节阀、止回阀，通过调节电动调节阀开度来对比阀门调节和转速调节。

（3）由 PLC 实现控制，操作方式简单，在屏幕上输入各参数数据，控制系统能够闭环实现。

在实习企业实践期间，与公司技术人员进行方案讨论，最终确定循环水厂泵站系统的结构方案，在 SolidWorks 软件中绘制循环水厂泵站系统三维模型图如图 4-1 所示。

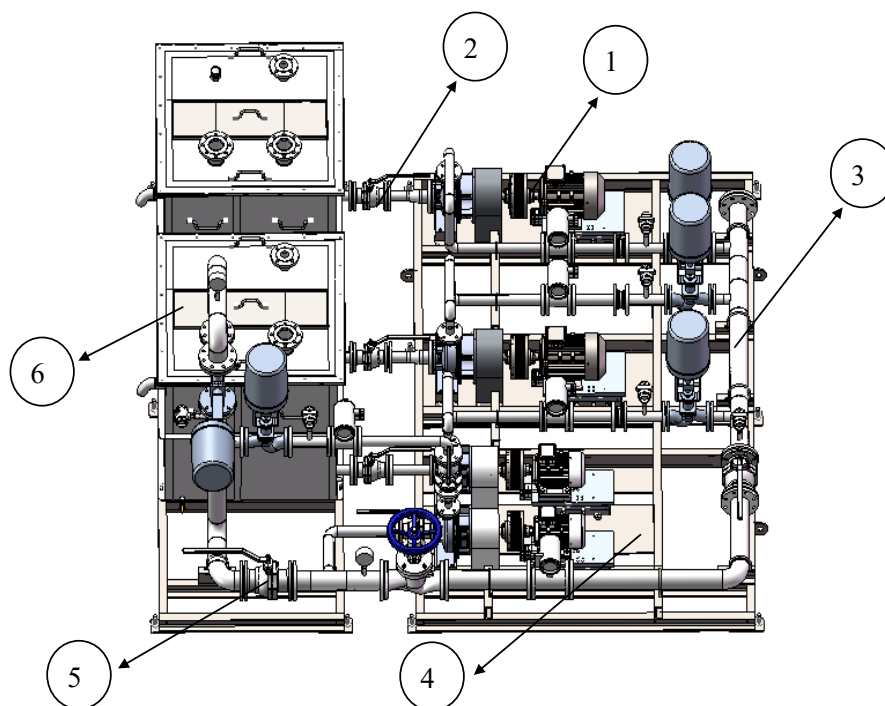


图 4-1 循环水厂泵站系统三维模型图

其主要由以下几部分组成：

(1) 调速系统：通过安装永磁调速器来调节离心泵转速，在三相异步电机的底部安装移动底座，利用伺服电机精确调控移动底座的位移方向。可实现永磁调速器耦合面积的动态调节，从而达到对离心泵输出转速的精准控制，如图 4-2 所示。

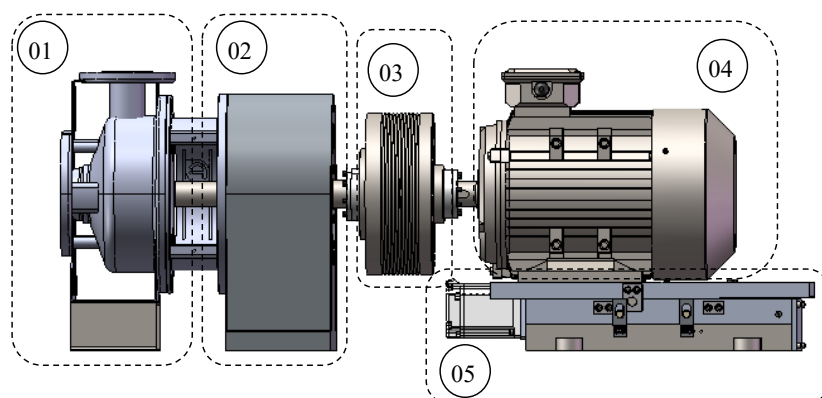


图 4-2 调速系统三维模型图

其中：

01：离心泵；02：轴承座；03：永磁调速器；04：电机；05：移动底座

(2) 离心泵进水组件：由浮动球阀和异径管组成，通过浮动球阀来控制离

心泵的进水。在使用离心泵时，开启球阀，使水箱的水进入离心泵中，防止离心泵空转启动，如图 4-3 所示。

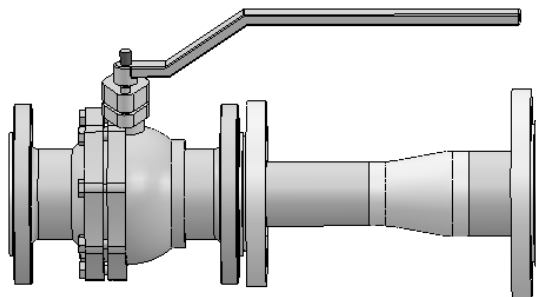


图 4-3 离心泵进水管路模型图

(3) 离心泵出水组件：采用出口法兰连接，出水管路配有流量计、止回阀、压力表和电动调节阀，如图 4-4 所示。流量计和压力表分别用来记录离心泵出水流量和压力，止回阀是防止循环水逆流，电动调节阀通过 PLC 进行调动，用来模拟不同工况下阀门调节和转速调节差异。

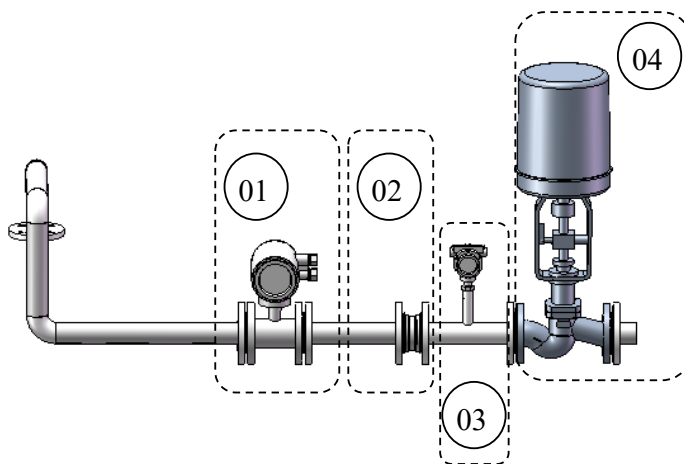


图 4-4 离心泵出水管路模型图

其中：

01：流量计；02：止回阀；03：压力变送器；04：电动调节阀

(4) 槽钢底座：采用 10 号槽钢底座和 U 型管组成，槽钢上焊有底板，放置调速系统。在两侧焊有吊耳用来移动槽钢底座，在槽钢上焊有 U 型管，如图 4-5 所示，通过 U 型管卡住水管，防止水管因水流动而晃动。

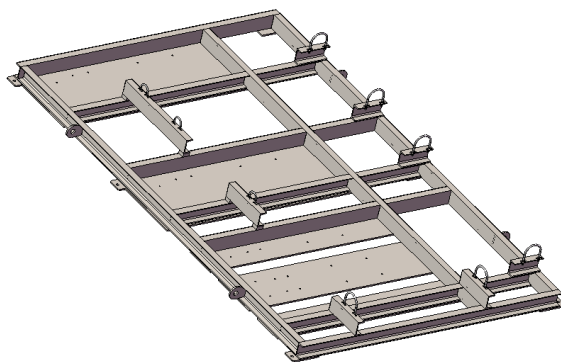


图 4-5 槽钢底座模型图

(5) 母管回水组件：离心泵母管配有流量计、止回阀、压力表、浮动球阀和电动调节阀，如图 4-6 所示。流量计用来记录离心泵母管总出水流量，压力表用来记录离心泵总压，浮动球阀在水系统关闭时开启，防止水箱循环水逆流进入母管。在启动系统时开启，PLC 系统对电动调节阀实时精确控制，以实现母管系统总流量或总压力的有效调节。

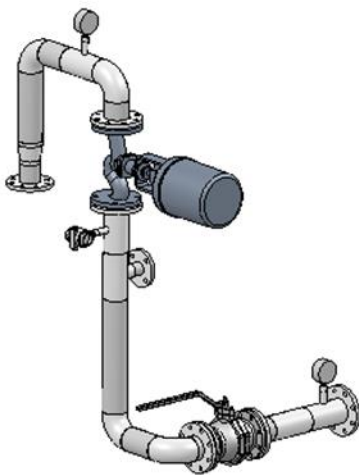


图 4-6 母管回水管路模型图

(6) 水箱：采用长宽高均为 1 米的二个水箱并联组成，通过水管相连，增加循环水的储存量，在水箱上开有出水法兰、进水法兰、溢流口以及排水口，如图 4-7 所示。

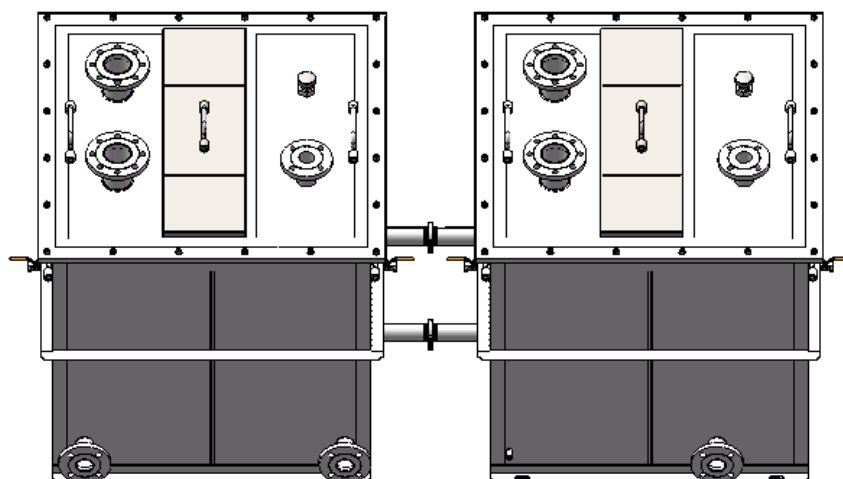


图 4-7 水箱三维模型图

4.2.2 实验设备及选型

(1) 手持式数字特斯拉计

特斯拉计用于测量永磁体磁体大小，观测其是否存在退磁现象。在本次实验中，借助特斯拉计对样机永磁托盘上的永磁体进行检测，从而保证实验结果的可靠性，其使用方式如图 4-8 所示。



图 4-8 手持式数字特斯拉计

(2) 手持式转速计

选用型号 VC6234P 型号手持式转速计，如图 4-9 所示。在进行输入端转速测量时，先从整张贴纸中剪下合适大小的反光贴纸，将其稳固地贴在电机的输入轴上，贴纸贴好后，调整光源位置，使手持式转速计投射于反光贴纸上，一切准备就绪后，启动电机，开始转速测量。



图 4-9 手持式转速计

(3) 图尔库测速装置

采用图尔库的测速探头和转速变送器，如图 4-10 所示。将测速探头固定在测速装置上，将探头对准与永磁转子相连的输出轴，所测得的数据通过转速变送器传输到控制系统，通过屏幕显示输出转速。



图 4-10 测速装置

(4) 多功能电表

采用带远传的多功能电表，将多功能电表与电机相连接，如图 4-11 所示。测量在不同工况下电机的输出电流和功率，通过对比不同工况下所消耗的功率来分析节能情况。



图 4-11 多功能电表

(5) 涡轮流量计与压力变送器

在此次实验中，通过选用带远程传输功能的涡轮流量计和压力变送器。将不同工况下离心泵所输出的流量和压力进行记录，并传送至控制系统，如图 4-12 所示。



图 4-12 涡轮流量计与压力变送器

(6) 投入式液位计

选用带远程传输功能的投入式液位计，如图 4-13 所示。在此次实验中对水箱中循环水的液位进行记录并传送至控制系统，防止开启多台离心泵时水箱循环水不够而造成离心泵空载启动。



图 4-13 投入式液位计

(7) 控制柜

针对上述各仪器仪表所测得的数据，通过 4-20mA 信号传输至控制系统，采集不同工况下泵站系统的各项测量数据，如图 4-14 所示。



图 4-14 控制柜

4.2.3 样机制作

与实习企业配合，完成了泵站系统控制程序的编写及调试，以及样机的加工与装配，最终样机如图 4-15 所示。



图 4-15 循环水厂泵站系统样机图

其中：

01：调速系统；02：离心泵进水组件；03：离心泵出水组件；04：槽钢底座；
05：母管回水组件；06：水箱；07：控制柜；

4.3 永磁调速器传动特性实验

4.3.1 实验装置及实验内容

永磁调速器的样机如图 4-16 所示，主要由三相异步电机、永磁调速器、移动底座、离心泵以及测速装置组成。所设计的样机的尺寸和选用材料与有限元分析模型一致。此外，需要剪下合适大小的反光贴纸，将其稳固地贴在电机的输入轴上，采用手持式测速仪对电机转速进行实时监测，从而确保所获数据的准确性与可靠性。



图 4-16 永磁调速器样机图

其中：

01：三相异步电机；02：永磁调速器；03：移动底座；04：离心泵；05：测速装置。

为测量永磁调速器在不同工况下的运行状况，按以下几个步骤进行操作：

（1）借助控制系统对伺服电机的行程进行控制，以此来调节永磁调速器的耦合面积。

（2）当各部件进入稳定运行状态后，利用测速设备对离心泵的输出转速 n_2 电机的输出转速 n_1 进行同步测量，在控制系统中多功能电表记录电机的消耗功率 P 。

（3）通过控制系统控制电动调节阀的开度调节转速差，待系统稳定运行后，测量并记录 n_1 、 n_2 、 P 。

（4）再次借助控制系统来调整永磁调速器的耦合面积，并重复上述实验步骤。

4.3.2 实验结果及数据分析

电机的有功功率 P 即为永磁调速器的输入功率 P_1 ，永磁调速器输入功率 P_1 和输出功率 P_2 的关系为：

$$P_2 = P_1(1 - \varepsilon) \quad (4-1)$$

永磁调速器传递的转矩为：

$$M_2 = M_1 = \frac{60P_1}{2\pi n_1}$$

(4-2)

实验结束后，对于每个测试点的实验数据，带入有限元仿真软件进行模拟，在 100%开度下实验与有限元数据如表 4-1 和图 4-17 所示。

表 4-1 在 100%开度下实验数据结果

输入转速	输出转速	转速差	有功功率	实验转矩	仿真转矩	误差
$n_1(\text{r/min})$	$n_2(\text{r/min})$	$\Delta n(\text{r/min})$	$P_2(\text{W})$	$M_2(\text{N}\cdot\text{m})$	$M_2(\text{N}\cdot\text{m})$	(%)
2979	2919	60	2528	8.104	8.391	3.418
2976	2906	70	2897	9.296	9.63	3.463
2968	2888	80	3258	10.483	10.74	2.388
2966	2876	90	3512	11.308	11.694	3.301
2965	2869	96	3687	11.875	12.165	2.38
2965	2865	100	3844	12.381	12.782	3.136
2964	2854	110	4131	13.31	13.629	2.342
2964	2848	116	4321	13.922	14.133	1.491
2964	2839	122	4483	14.459	14.643	1.258
2961	2835	126	4566	14.727	14.903	1.184
2961	2831	130	4680	15.094	15.18	0.565

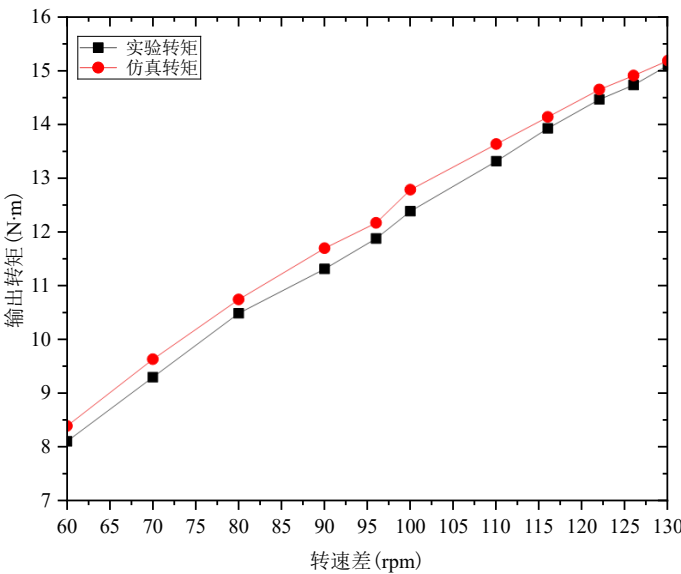


图 4-17 100%开度下输出转矩对比图

在 100%开度下，实验所测得的数据与仿真结果之间存在误差，误差在 5% 以内，处于工程允许范围内。仿真结果与实验测量的输出转矩变化趋势相吻合，验证了有限元方法在永磁调速器仿真中的适用性。

两组数据之间存在误差，主要由于在仿真过程中，有限元分析对三维模型进

行了简化处理，同时网格划分和采样步长的设置会对结果产生一定影响。此外，由于永磁调速器在泵站系统装置上的模拟需求，输出轴无法安装转矩传感器，只能通过电机的有功功率间接推算输出转矩，而在实际运行中的机械损耗和涡流损耗等因素被忽略，导致两组数据之间存在误差。

4.4 永磁调速器的调速特性

通过控制系统将电动调节阀的阀口全部打开，对永磁调速器的开度进行调节，由此得到在不同开度下离心泵功率和流量变化情况，如图 4-18 和 4-19 所示。

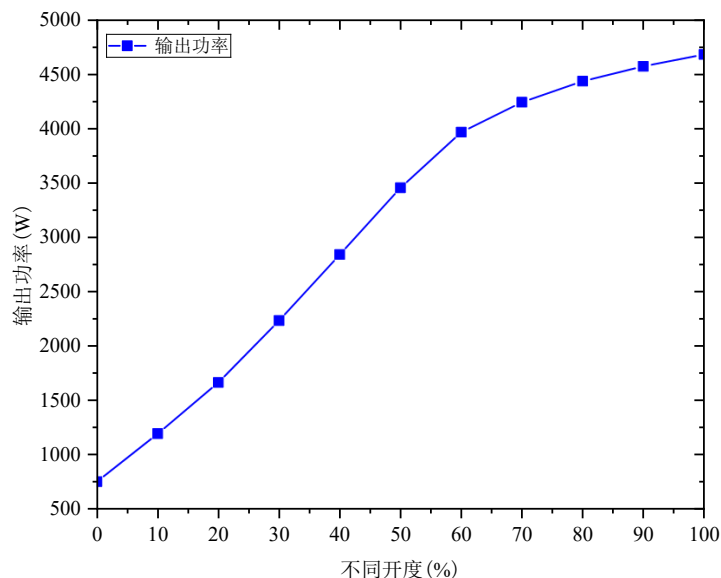


图 4-18 不同开度下的输出功率

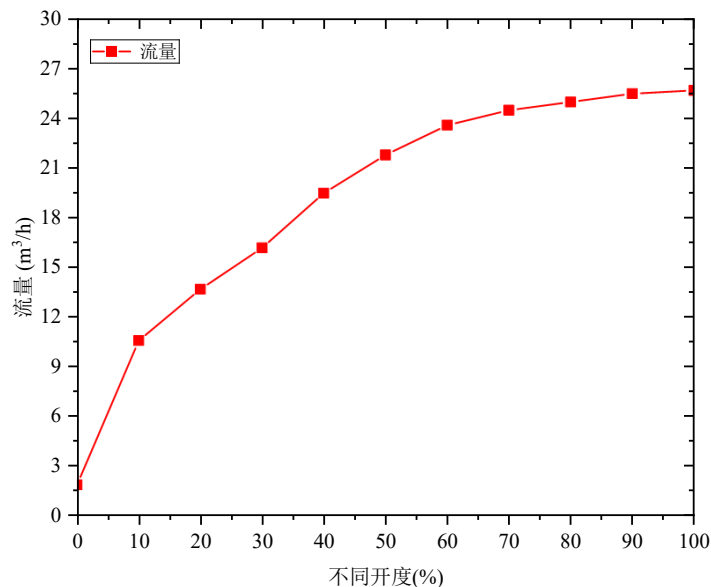


图 4-19 不同开度下的流量特性

从图中能够发现随着开度不断增大，离心泵输出功率和流量也随之增加。当

开度较小时，离心泵的输出功率和流量随开度的变化较为明显；当开度达到一定时，离心泵功率和流量的变化逐渐趋于平滑，这表明永磁调速器通过开度调节具有良好的平滑性。图 4-20 显示了永磁调速器输出转速随开度变化的曲线，随着开度的增大，负载转速逐渐上升，转差率在不断减小。

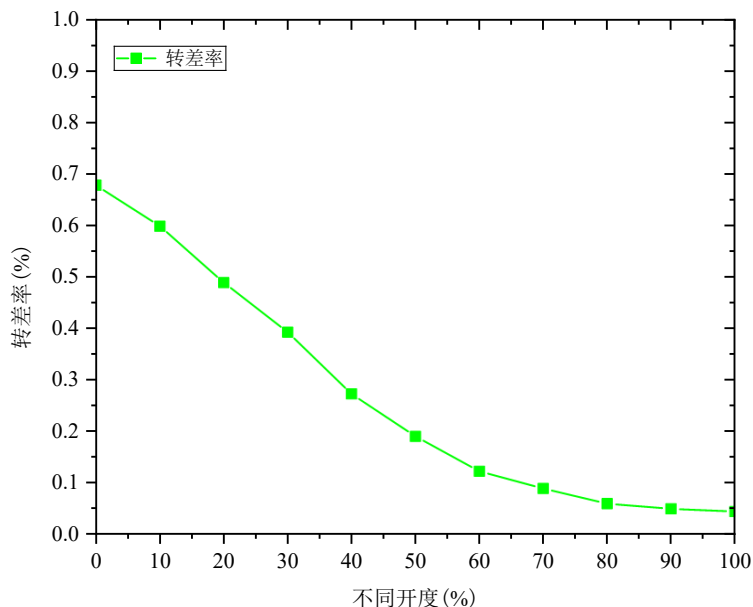


图 4-20 不同开度下的转差率

通过改变永磁调速器的开度，可以有效调节离心泵的输出流量，同时通过调整离心泵的转速，能够精确匹配电机输出功率与流量的变化。

4.5 本章小结

本章详细阐述了循环水厂泵站系统样机的设计与搭建流程，以及各类仪器仪表的选型，并将永磁调速器安装在电机与离心泵之间。通过专业设备对永磁调速器的运行参数进行精确测量，对于每个测试点的实验数据，导入有限元仿真软件进行模拟。仿真结果与实验数据的对比显示，误差在 5% 以内，处于工程允许范围内。通过有限元仿真模拟永磁调速器的传动特性，能够显著缩短设计研发周期，为其工程应用提供了可靠支持。此外，对永磁调速器开度的调节证明了其具有优异的传动性能。

第 5 章 泵站系统节能研究

5.1 引言

并联离心泵作为泵站系统的主要组合形式，在化工、火电、城市供水等诸多领域广泛应用，泵类产品在中国消耗约 20% 的工业用电，在很多行业中泵消耗的电能甚至高达 25%，正因为泵的使用如此广泛，针对泵站系统的节能研究，就显得尤为关键^[62]。实现泵站系统的高效节能，主要在于离心泵的优化设计与调节运行这两种途径，在离心泵的优化设计方面，历经众多研究人员多年的不懈努力，诸多离心泵的整体效率已成功突破 90%，进一步提升的空间极为有限^[63]。因此，泵站系统的节能主要在于调节运行这一方面，将永磁调速器应用于泵站系统，来评估离心泵转速调节的节能效果。

5.2 离心泵节能原理

目前大部分离心泵采用额定功率驱动，通过在离心泵出口安装阀门来调节流量。这种调节方式存在严重弊端，易造成大量能量损耗。按照离心泵的设计选型，一般会依据其最大负载来配置离心泵，以确保泵站系统在最大流量需求时，离心泵仍能满足使用要求。但在生产时，泵站系统在多数情况下并不是需要满负荷运转，而是根据生产需求借助阀门来调节流量。通过阀门调节流量时，电机和负载的转速维持恒定，功率消耗也保持不变，从而导致大量能量在阀门处被无效损耗，所以改进离心泵的调节方式，是节能减排的关键举措^[64]。

在离心泵的相关理论中，存在泵的相似定律，该定律表明离心泵的扬程、流量、轴功率与转速之间存在特定关联，其相似定律具体内容如下：

$$\begin{cases} \frac{Q_1}{Q_0} = \frac{n_1}{n_0} = k \\ \frac{H_1}{H_0} = \left(\frac{n_1}{n_0} \right)^2 = k^2 \\ \frac{P_1}{P_0} = \left(\frac{n_1}{n_0} \right)^3 = k^3 \end{cases} \quad (5-1)$$

式中：“0”表示额定转速，“1”表示变速值。

根据泵的相似定律，当离心泵转速降至 90% 时，系统压力会降低至原来的

81%，同时所需功率也减少至原来的 79.2%，详见表 5-1 所示。

表 5-1 离心泵转速调节性能表

转速 (%)	流量 (%)	压力 (%)	轴功率 (%)	节电率 (%)	备注
100	100	100	100	0	
90	90	81	72.9	27.1	由于调速装置效率的影响，实际节电率将低于表格中的数值
80	80	64	51.2	48.8	
70	70	49	34.4	65.6	
60	60	36	21.6	78.4	

在调节过程中转速调节与阀门调节时离心泵工况点变化，如图 5-1 所示。

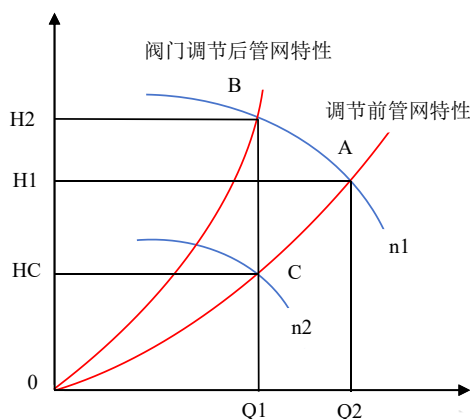


图 5-1 转速调节与阀门调节工况点变化

离心泵在正常运行时工况点为 A 点，所需能耗的计算通常基于以下公式：

$$P = \frac{\rho g H_1 Q_2}{1000} \quad (5-2)$$

当生产所需流量从 Q_2 降低至 Q_1 时，若采用阀门调节，管网曲线将发生改变，

工况点随之从 A 点移动至 B 点，此时对应的能耗为：

$$P_1 = \frac{\rho g Q_1 H_2}{1000} \quad (5-3)$$

当采用转速调节时，管网特性保持不变，离心泵转速从 n_1 降至 n_2 ，导致泵的特性曲线下移，工况点由 A 点移至 C 点，此时所需能耗为：

$$P_2 = \frac{\rho g Q_1 H_C}{1000} \quad (5-4)$$

通过对比 B 点与 C 点，可得到：

$$\Delta P = \frac{\rho g Q_1 (H_2 - H_C)}{1000} = P_1 - P_2 \quad (5-5)$$

与阀门调节相比,转速调节可节约 ΔP 能耗,具有良好的节能效果,在实际生产中,不仅要确保流量满足生产需求,还需要兼顾系统压力是否达标。根据离心泵产品在实际生产工况的数据统计,离心泵采用转速调节,节能幅度可达10%~60%。因此,相较于阀门调节,离心泵负载采取转速调节更为节能。

5.3 泵站系统不同调节方式节能研究

在循环水系统中,阀门调节和转速调节作为离心泵运行的调节方式,其能耗特性差异巨大。采用阀门调节的方式会导致能源的大量浪费,而离心泵通过永磁调速器进行转速调节可以根据流量需求进行调控,有效降低能耗。因此,对比两种调节方式有助于挖掘泵站系统的节能潜力^[65]。

5.3.1 实验方案设计

采用水循环系统样机实验平台,由1台3kW离心泵和2台5.5kW离心泵并联组成一个循环水系统,型号如图5-2所示。每台离心泵都配有永磁调速器、涡轮流量计、压力变送器、多功能电表、止回阀以及电动调节阀,离心泵出口压力和流量由压力变送器和流量计测量并反馈到控制系统,多功能电表采集电机所消耗的功率,控制系统通过控制永磁调速器和电动调节阀的开度调节所需流量。

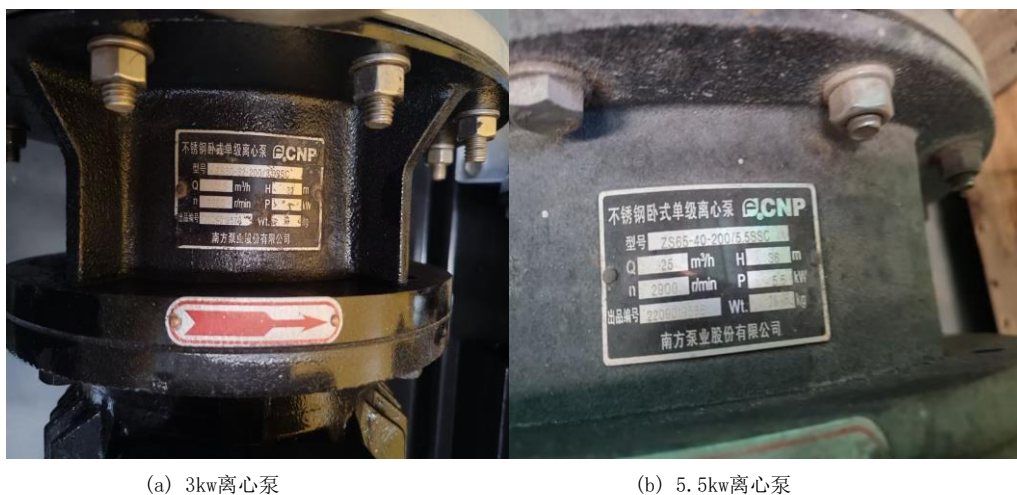


图 5-2 离心泵型号图

通过水循环系统装置模拟出不同水力需求下,离心泵转速调节和阀门调节的节能情况。在水循环系统实验中,需要对单台离心泵、两台离心泵和三台离心泵的工况进行分析。在实际运行中,离心泵的扬程往往与额定扬程存在偏差,因此需在实验前进行初步测量,为实验方案的设计提供依据。对离心泵的最大流量进

行分组，得到在实验条件下的最大流量如表 5-2 所示。

表 5-2 实际条件下离心泵组合的最大流量

离心泵组合	离心泵 1 单独运行	离心泵 2 单独运行	离心泵 3 单独运行	离心泵 1 和离心泵 2 并联	离心泵 1 和离心泵 3 并联	三台离心 泵并联
最大流量 $Q(m^3/h)$	25	25	13	50	37	62

根据不同离心泵组合的最大流量，将其划分为 5 个区间，以实现针对不同流量工况的调节方案：

- (1) 当所需流量在 $0m^3/h < Q \leq 13m^3/h$ 时，采用离心泵 3 单独运行。
- (2) 当所需流量在 $13m^3/h \leq Q \leq 25m^3/h$ 时，采用离心泵 1 单独运行。
- (3) 当所需流量在 $25m^3/h < Q \leq 37m^3/h$ 时，采用离心泵 1 和离心泵 3 并联运行。
- (4) 当所需流量在 $37m^3/h < Q \leq 50m^3/h$ 时，采用离心泵 1 和离心泵 2 并联运行。
- (5) 当所需流量在 $50m^3/h < Q \leq 62m^3/h$ 时，采用三台离心泵并联运行。

5.3.2 实验过程

转速调节：分别在屏幕控制系统上输入三台离心泵所需流量，离心泵 1、离心泵 2、离心泵 3 通过调节永磁调速器耦合面积和流量计形成控制闭环，使母管出口流量达到要求范围内，记录转速调节情况下所输出的数据，点击保存，系统重新操作，如图 5-3 所示。

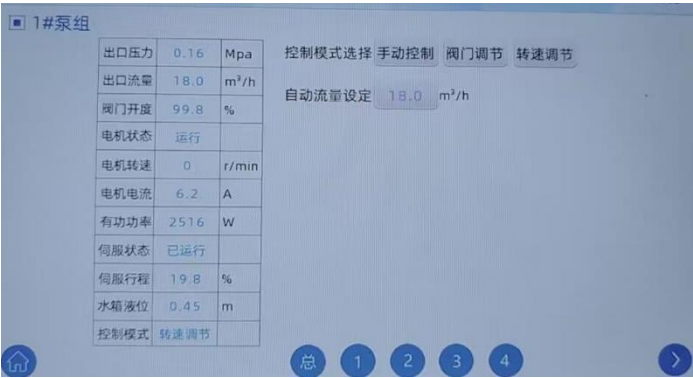


图 5-3 控制系统操控图

阀门调节：离心泵 1、离心泵 2、离心泵 3 通过永磁调速器使离心泵满流量运行，使用电动调节阀和流量计形成控制闭环调节出口流量，使母管出口流量达到要求范围内，记录阀门调节情况下所输出的数据，点击保存，系统重新操作。

根据所给的 5 个流量区间，依次进行转速和阀门调节实验，通过开启对应离心泵台数，并在控制系统上输入所需流量，记录不同调节方式下所输出的数据，进行节能分析。

5.3.3 实验结果及数据分析

所需流量在 $0\text{m}^3/\text{h} < Q \leq 13\text{m}^3/\text{h}$ 时，离心泵 3 单独运行时能耗数据如表 5-3 和图 5-4 所示。

表 5-3 离心泵 3 不同调节方式能耗对比

流量 (m^3/h)	阀门调节			转速调节			节能率 K (%)
	阀门开 度(%)	电流 I (A)	功率 P_I (W)	行程 (%)	电流 I (A)	功率 P_I (W)	
3	6	4.3	2360	19.656	3	1357	42.5
4	11.9	4.4	2406	22.386	3.1	1422	40.9
5	20.3	4.5	2497	25.298	3.3	1507	39.6
6	35	4.6	2535	32.032	3.3	1678	33.8
7	38.2	4.6	2585	38.948	3.4	1786	30.9
8	43.2	4.7	2606	43.134	3.6	1922	26.2
9	50	4.7	2628	47.502	3.8	2029	22.8
10	56	4.8	2657	51.688	4.1	2187	17.7
11	65	4.9	2695	57.33	4.4	2383	11.6
12	85.1	5	2730	71.162	4.7	2586	5.3
13	93.1	5.1	2832	91	5.1	2827	0.2

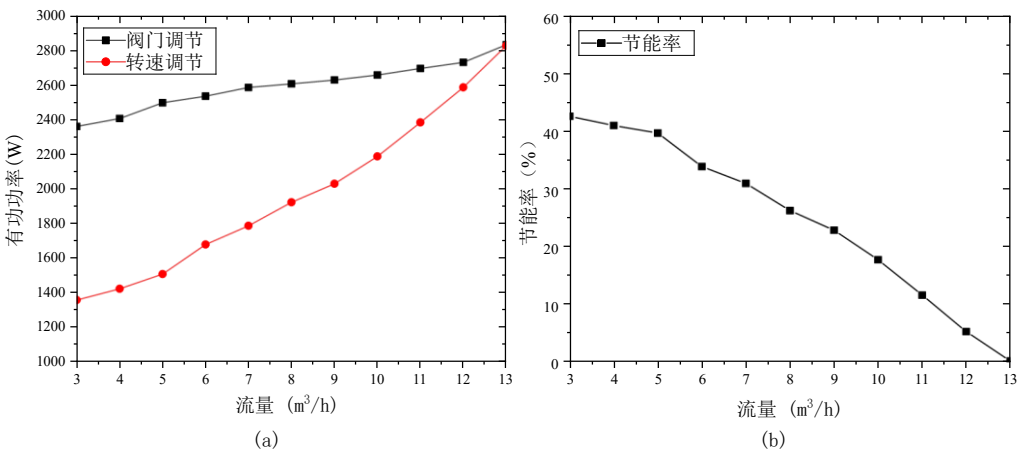


图 5-4 离心泵 3 阀门调节与转速调节能耗分析图

在 3kW 离心泵单独运行情况下，转速调节相较于阀门调节更为节能，节能率随流量的增加逐渐减小。采用永磁调速器进行转速调节，越偏离离心泵的额定状态，阀门调节所带来的损失越大，永磁调速器的节能空间就越大，最高节能率可达 42.5%，平均节能率为 24.7%。

当所需流量在 $13\text{m}^3/\text{h} \leq Q \leq 25\text{m}^3/\text{h}$ 时，离心泵 1 单独运行时能耗数据如表 5-4 和图 5-5 所示。

表 5-4 离心泵 1 不同调节方式能耗对比

流量 (m^3/h)	阀门调节			转速调节			节能率 K (%)
	阀门开 度(%)	电流 I (A)	功率 P_I (W)	行程 (%)	电流 I (A)	功率 P_I (W)	
13	47.8	6.5	2712	19.5	5.4	1574	42.0
14	51.7	7.2	3290	22.6	5.5	1962	40.4
15	56	7.5	3582	26.0	5.7	2155	49.8
16	60.4	7.6	3663	29.5	5.8	2275	37.9
17	64.5	7.7	3844	32.8	6	2476	35.6
18	69.4	7.8	3960	36.0	6.2	2616	33.9
19	74	8.1	4035	39.7	6.5	2824	30.0
20	78.7	8.1	4115	43.3	6.9	3126	24.0
21	82.7	8.2	4225	47.3	7.2	3395	19.6
22	86.4	8.3	4311	52.2	7.5	3570	17.2
23	89.6	8.4	4403	57.9	7.7	3806	13.6
24	93.4	8.5	4426	65.0	8	4191	5.3
25	96.7	8.7	4533	81.0	8.5	4422	2.4

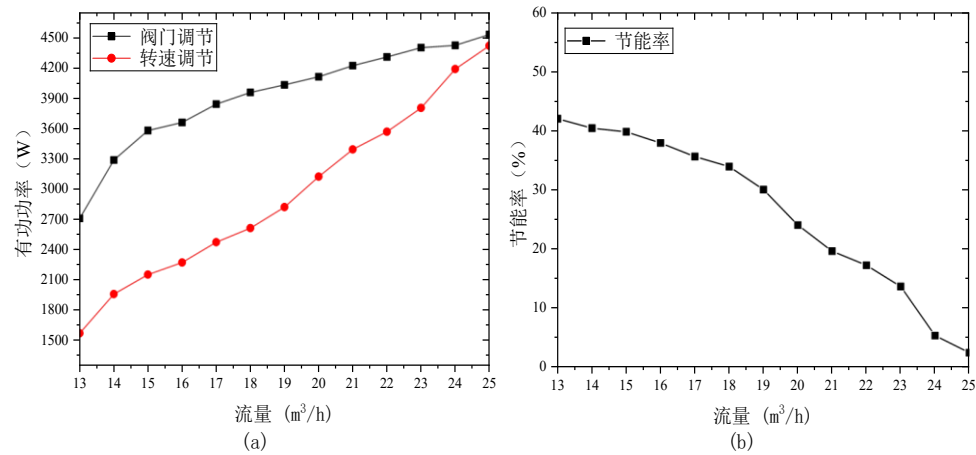


图 5-5 离心泵 1 阀门调节与转速调节能耗分析图

在 5.5kW 离心泵单独运行情况下，转速调节相较于阀门调节更为节能，节能率随流量的增加逐渐减小。采用永磁调速器进行转速调节，越偏离离心泵的额

定状态，阀门调节所带来的损失越大，永磁调速器的节能空间就越大，最高节能率可达 42%，平均节能率为 26.9%。

当所需流量在 $25\text{m}^3/\text{h} < Q \leq 37\text{m}^3/\text{h}$ 时，使用离心泵 1 和离心泵 3 并联调节，两台离心泵并联运行时，系统的出水流量会得到显著提升。在并联运行时，具有四种组合调节方式，离心泵 1 和离心泵 3 转速调节运行；离心泵 1 额定运行，离心泵 3 转速调节运行；离心泵 1 转速调节运行，离心泵 3 额定运行；离心泵 1 和离心泵 3 阀门调节运行；通过对比四种方式运行，分析离心泵 1 和离心泵 3 并联调节运行节能情况，能耗数据如图 5-6 和 5-7 所示。

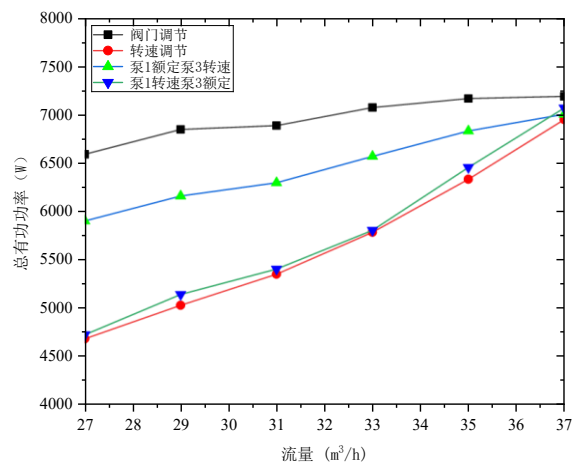


图 5-6 离心泵 1 和离心泵 3 并联运行时总有功功率

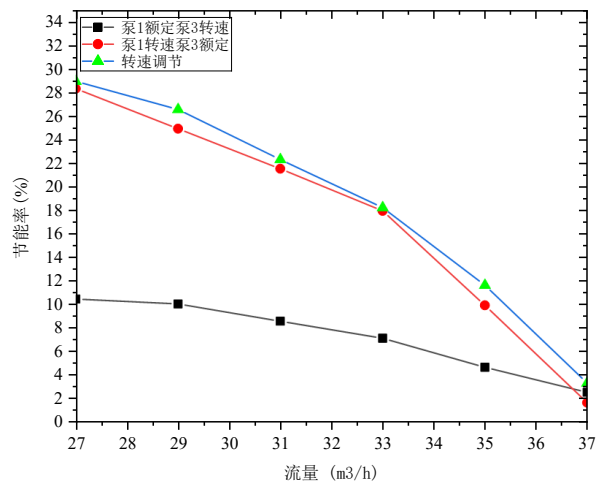


图 5-7 离心泵 1 和离心泵 3 并联运行时节能率

在 1 台 5.5kW 离心泵与 1 台 3kW 离心泵并联运行情况下，转速调节相较于阀门调节和部分转速调节更为节能，节能率随流量的增加逐渐减小。采用永磁调速器进行转速调节，越偏离离心泵的额定状态，阀门调节和部分转速调节所带来

的损失越大,永磁调速器的节能空间就越大,最高节能率可达 28.9%,平均节能率为 18.5%。

当所需流量在 $37\text{m}^3/\text{h} < Q \leq 50\text{m}^3/\text{h}$ 时,使用离心泵 1 和离心泵 2 并联调节。在并联运行时,由于离心泵 1 和离心泵 2 是同型号离心泵,具有三种组合调节方式,离心泵 1 和离心泵 2 转速调节运行;离心泵 1 额定运行,离心泵 2 转速调节运行;离心泵 1 和离心泵 2 阀门调节运行;通过对比三种模式运行,分析离心泵 1 和离心泵 2 并联调节运行节能情况,能耗数据如图 5-8 和 5-9 所示。

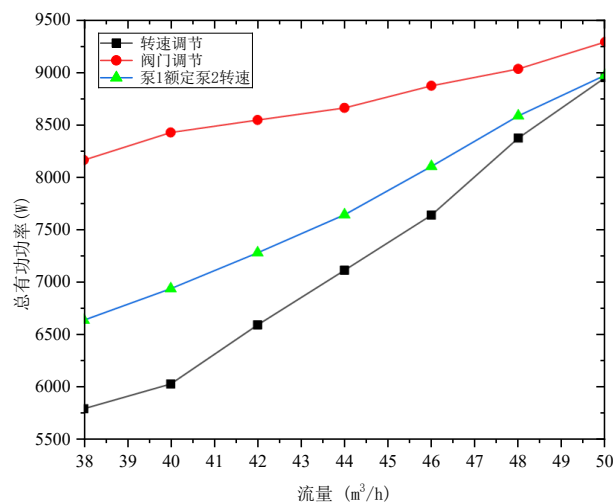


图 5-8 离心泵 1 和离心泵 2 并联运行时总有功功率

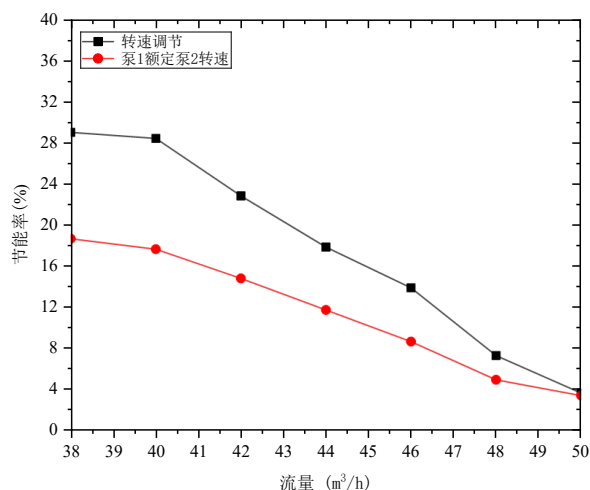


图 5-9 离心泵 1 和离心泵 2 并联运行时节能率

在 2 台 5.5kW 离心泵并联运行情况下,转速调节相较于阀门调节和部分转速调节更为节能,节能率随流量的增加逐渐减小。采用永磁调速器进行转速调节,越偏离离心泵的额定状态,阀门调节所带来的损失越大,永磁调速器的节能空间

就越大，最高节能率可达 29%，平均节能率为 17.6%。

当所需流量在 $50\text{m}^3/\text{h} < Q \leq 62\text{m}^3/\text{h}$ 时，使用三台离心泵并联。在并联运行时，具有五种组合调节方式，由于离心泵 1 和离心泵 2 是同型号离心泵，三台离心泵同时转速调节运行；离心泵 1 转速调节运行，离心泵 2 和离心泵 3 额定运行；离心泵 1 和离心泵 2 转速调节运行，离心泵 3 额定运行；离心泵 1 和离心泵 3 转速调节，离心泵 2 额定运行；三台离心泵阀门调节运行。通过对比五种模式运行，分析三台离心泵并联调节运行节能情况，能耗数据如图 5-10 和 5-11 所示。

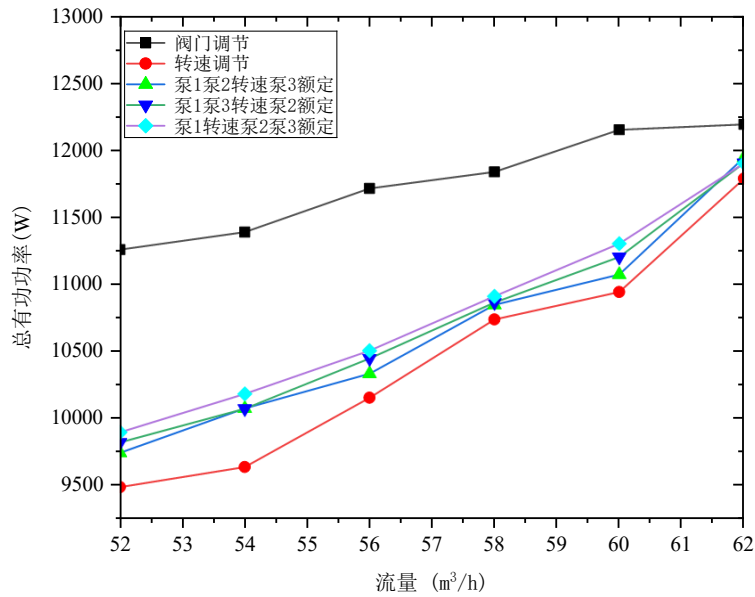


图 5-10 三台离心泵并联运行时总有功功率

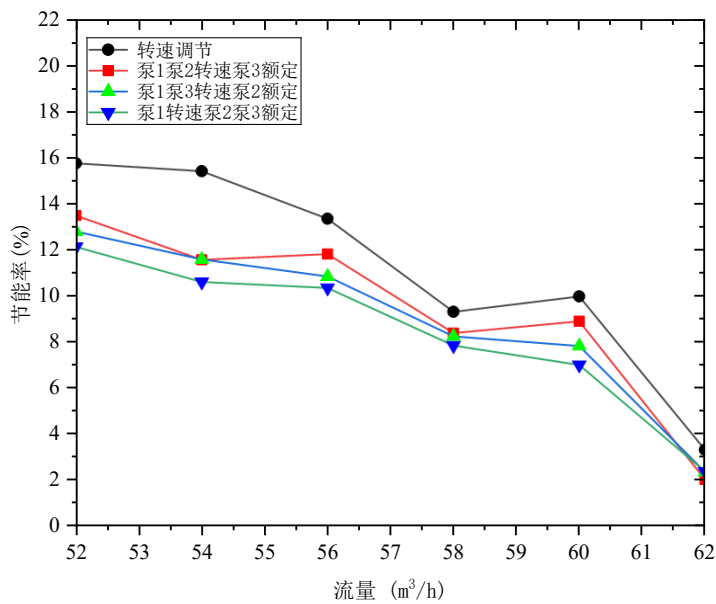


图 5-11 三台离心泵并联运行时节能率

在三台离心泵并联运行情况下,转速调节相较于阀门调节和部分转速调节更为节能,节能率随流量的增加逐渐减小,最高节能率可达 15.7%,平均节能率为 11.2%。

通过对比阀门调节、部分转速调节和转速调节,能够得到转速调节更为节能。使用永磁调速器对离心泵进行转速调节,可以根据流量需求进行调控,能够有效降低能耗,对企业节能提供有效途径。

5.4 泵站系统并联运行方式节能研究

5.4.1 离心泵并联运行特点

考虑到不同生产需求时所需流量可能不同,泵站系统通常会安装多台离心泵并联以满足不同生产需求时的流量变化,并联离心泵具有以下特点:

(1) 离心泵并联运行时,与单台离心泵相比所输出流量更大,可满足不同工况下的流量需求,同时能够灵活控制离心泵的启停台数,增强系统调节的多变性。

(2) 离心泵并联运行可大大提高系统的稳定性,即使一台离心泵出现故障需要维修,其他离心泵仍可正常输出流量,确保生产需求的稳定性。

(3) 并联离心泵之间可以相互切换,有效防止因长时间连续运行而产生的疲劳和磨损,减少维护次数。

离心泵并联运行时,在泵站系统中应用永磁调速器,根据生产实际需求,灵活调节各台离心泵的输出转速,以达到泵站系统节能要求^[66]。

5.4.2 离心泵并联数学模型

在额定转速条件下,离心泵的扬程与流量关系可采用二次多项式进行拟合表达,表达式为:

$$H = A_0 + A_1Q + A_2Q^2 \quad (5-6)$$

式中 H 为离心泵扬程,单位为 m , Q 为离心泵流量,单位为 m^3/h , A_0 、 A_1 、 A_2 为拟合系数。同理,离心泵的效率与流量关系也可采用二次多项式进行拟合表达^[67],表达式为:

$$\eta = B_0 + B_1Q + B_2Q^2 \quad (5-7)$$

采用永磁调速器对离心泵实施转速调控，定义其调速率为 $k(k \leq 1)$ ：

$$k = \frac{n_{after}}{n_{nom}} \quad (5-8)$$

式中 n_{after} 为调速后的转速， n_{rated} 为额定转速，由离心泵的相似定律得：

$$k = \frac{n_{after}}{n_{nom}} = \frac{Q_{after}}{Q_{nom}} = \left(\frac{H_{after}}{H_{nom}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5-9)$$

将（5-9）代入（5-7）中，得：

$$\eta_{after} = B_0 \frac{Q_{after}^2}{k^2} + B_1 \frac{Q_{after}}{k} + B_2 \quad (5-10)$$

式中， η_{after} 为调速后离心泵的效率， Q_{after} 为调速后的流量。

针对同型号离心泵并联运行的系统展开研究，假设系统由若干台相同规格的离心泵并联组成，如图 5-12 所示，这些离心泵统一从进水口 A 点进水，并通过共同的出水口 B 点出水， $Q_1 \sim Q_m$ 为各台离心泵出水流量， Q_{total} 为并联离心泵总出水量。

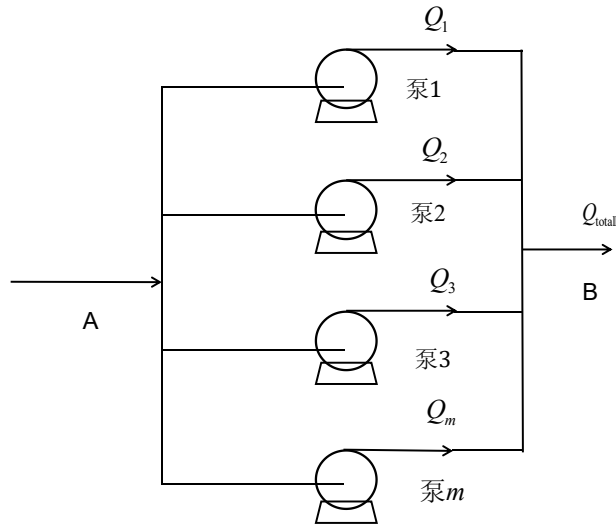


图 5-12 离心泵并联运行

若投入运行的离心泵台数为 m ，由离心泵并联运行特性可得^[68]：

$$P_x = \rho g H_x Q_x \quad (5-11)$$

$$\eta_x = \frac{P_x}{P_{Nx}} \quad (5-12)$$

$$P_u = \sum_{x=1}^m P_x \quad (5-13)$$

$$P_N = \sum_{x=1}^m P_{Nx} \quad (5-14)$$

$$Q_{total} = \sum_{x=1}^m Q_x \quad (5-15)$$

$$\eta_P = \frac{P_u}{P_N} \quad (5-16)$$

$$H_1 = H_2 = \dots H_x = H_{total} \quad (5-17)$$

式中： P_x 为第 x 台泵的有效功率， P_{Nx} 为第 x 台泵的轴功率， η_x 为第 x 台泵的效率， H_x 为第 x 台泵的扬程， Q_x 为第 x 台泵输出流量， ρ 为液体密度， g 为重力加速度， P_u 为并联离心泵的总有效功率， P_N 为并联离心泵的总消耗轴功率， Q_{total} 为并联离心泵的总输出流量， η_P 为并联离心泵的效率， H_{total} 为并联离心泵的总扬程。

若并联离心泵系统满足既定生产流量需求 Q_{total} 的条件下，若实现总消耗轴功率 P_N 最小，根据式（5-14）可知，该优化问题可转化为寻求并联离心泵系统整体效率 η_P 最大问题。通过最大化系统效率，可有效降低总轴功率消耗，从而达到节能优化的目的^[69]，假设第 x 台离心泵效率为：

$$\eta_{P-x} = B_0 \frac{Q_x^2}{k_x^2} + B_1 \frac{Q_x}{k_x} + B_2 \quad (5-18)$$

依据实际经验可知，当实际转速低于额定转速 50%时，其效率会显著下降^[70]，故：

$$0.5 \leq k < 1 \quad (5-19)$$

以各台离心泵的平均效率作为并联离心泵的整体效率，进而开展优化，故：

$$\eta_{ave} = \frac{\sum_{x=1}^m \eta_x}{x} \quad (5-20)$$

当并联系统中离心泵的数量 m 一定时, 整体效率的优化问题简化为对 x 台离心泵效率的求和最大化。因此, 该优化目标对应的目标函数可表示为:

$$\eta_{sum} = \sum_{x=1}^m \left(B_0 \frac{Q_x^2}{k_x^2} + B_1 \frac{Q_x}{k_x} + B_2 \right) \quad (5-21)$$

约束条件为:

$$\sum_{x=1}^m Q_x = Q_{total} \quad (5-22)$$

式中, Q_x 为第 x 台离心泵的流量, k_x 为第 x 台离心泵的调速率, 求解并联离心泵的最小轴功率转化成求解最大值 η_{sum} 时, 各台离心泵的流量分配问题。

对于多个变量与多个约束, 如果仅通过变量替换进行求解时, 会使目标函数变得更为复杂, 本文运用拉格朗日乘数法求解目标函数, 该方法核心思路是把原始优化目标转化为带约束条件的优化目标, 对于约束条件引入拉格朗日乘子来处理, 将约束条件转化为无约束条件的极值问题, 从而更方便地求解最优解^[71]。

构建辅助函数, 可得:

$$L(Q_x, \lambda) = \sum_{x=1}^m \left(B_0 \frac{Q_x^2}{k_x^2} + B_1 \frac{Q_x}{k_x} + B_2 \right) + \lambda \left(\sum_{x=1}^m Q_x - Q_{total} \right) \quad (5-23)$$

辅助函数取极大值时偏导数等于零, 对辅助函数 $L(Q_x, \lambda)$ 求偏导, 可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial L(Q_x, \lambda)}{\partial Q_x} = 0 \\ \frac{\partial L(Q_x, \lambda)}{\partial \lambda} = 0 \end{cases} \quad (5-24)$$

由式 (5-24) 得:

$$\begin{cases} \frac{2B_0 Q_x}{k_x^2} + \frac{B_1}{k_x} + \lambda = 0; x = 1, 2, 3 \cdots, m \\ \sum_{x=1}^m Q_x - Q_{total} = 0; x = 1, 2, 3 \cdots, m \end{cases} \quad (5-25)$$

即:

$$\frac{2B_0Q_1}{k_1^2} + \frac{B_1}{k_1} = \frac{2B_0Q_2}{k_2^2} + \frac{B_1}{k_2} = \dots = \frac{2B_0Q_x}{k_x^2} + \frac{B_1}{k_x} = -\lambda \quad (5-26)$$

对于（5-26）取前两项进行分析，把（5-9）代入（5-26），得：

$$\frac{2B_0Q_{\text{nom}}^2 + B_1Q_{\text{nom}}}{Q_1} = \frac{2B_0Q_{\text{nom}}^2 + B_1Q_{\text{nom}}}{Q_2} \quad (5-27)$$

而 B_0 和 B_1 为拟合参数，由离心泵实验测试能够得到，若使等式（5-27）成立，

即 $Q_1 = Q_2$ ，由此可得当辅助函数 L 取极大值时：

$$Q_1 = Q_2 = \dots = Q_m \quad (5-28)$$

对于并联运行的同型号离心泵系统，当各泵的输出流量保持相等时，其运行转速也将呈现一致性，故：

$$n_1 = n_2 = \dots = n_m \quad (5-29)$$

当 m 台同型号离心泵以并联方式协同运行时，各台离心泵输出转速保持同步一致，此时并联系统的整体效率 η_p 将达到峰值，这种运行状态不仅实现了泵站系统的效率最优化，同时使得系统总功耗降至最低水平，从而达到了最佳的节能效果。

5.4.3 实验方案

本次实验对并联运行的离心泵实施同转速运行，在不同流量的下，验证同转速运行能否使得泵站系统消耗功率最低，以两台 $5.5kW$ 同型号离心泵作为实验设备，以实际组合的最大流量为取值范围，选取流量 $30\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $35\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $40\text{ m}^3/\text{h}$ 为实验对象。

在实验过程中，首先通过调节永磁调速器的开度，确保各台离心泵的输出流量之和能够满足总流量需求，随后，分别调节两台移动底座的行程，使两台离心泵的输出转速不同，但各台离心泵的输出流量之和仍能够满足总流量需求，以固定步长逐步降低一台永磁调速器的开度，同时同步调整另一台设备的开度，确保每次调节后的转速组合均能满足水力工况要求。

在调节期间，读取当前移动底座的行程，并记录两台离心泵在不同行程下的各项数据，在调节过程中，需确保离心泵始终高效运行，将调速率 k 保持在 $(0.5, 1)$

范围内,分别调节流量需求,记录不同流量下各台离心泵不同转速下的输出功率,并与同转速进行对比分析^[72]。

5.4.4 实验结果分析

在流量为 $30\text{ m}^3/\text{h}$, 实验记录的数据如表 5-5 所示, 包括两台离心泵的输出转速、功率以及总有功功率, 定义两台离心泵转速配置之比为 n_1/n_2 , 当转速配置比为 1 时, 两台离心泵为同转速运行。

表 5-5 流量为 $30\text{ m}^3/\text{h}$ 时不同转速配置比能耗对比

流量	泵 1 输出 转速 n_1 (rpm)	泵 2 输出 转速 n_2 (rpm)	泵 1 有功 功率 (W)	泵 2 有功 功率 (W)	转速配置比 (n_1/n_2)	总有功功 率 P (W)	相对节 能率 (%)
30	1702	1702	1800	1859	1.000	3659	0.00
	1749	1641	1857	1847	1.066	3704	1.22
	1793	1619	1920	1789	1.107	3709	1.35
	1826	1575	2077	1758	1.159	3835	4.59
	1855	1536	2138	1725	1.208	3863	5.28
	1865	1459	2224	1709	1.278	3933	5.82
	1921	1389	2343	1668	1.383	4011	7.53
	1953	1334	2578	1651	1.464	4229	9.32
	1979	1275	2647	1649	1.552	4296	10.08

根据表中数据, 使用 Origin 软件绘制出在不同流量下, 转速配置比与输出总功率和相对节能率关系曲线, 如图 5-13 所示。在流量为 $30\text{ m}^3/\text{h}$ 时, 随着转速配置比的增加, 总有功功率在不断增加, 相对节能率在不断提高, 最高可达到 10.08%, 平均节能率为 5.65%。

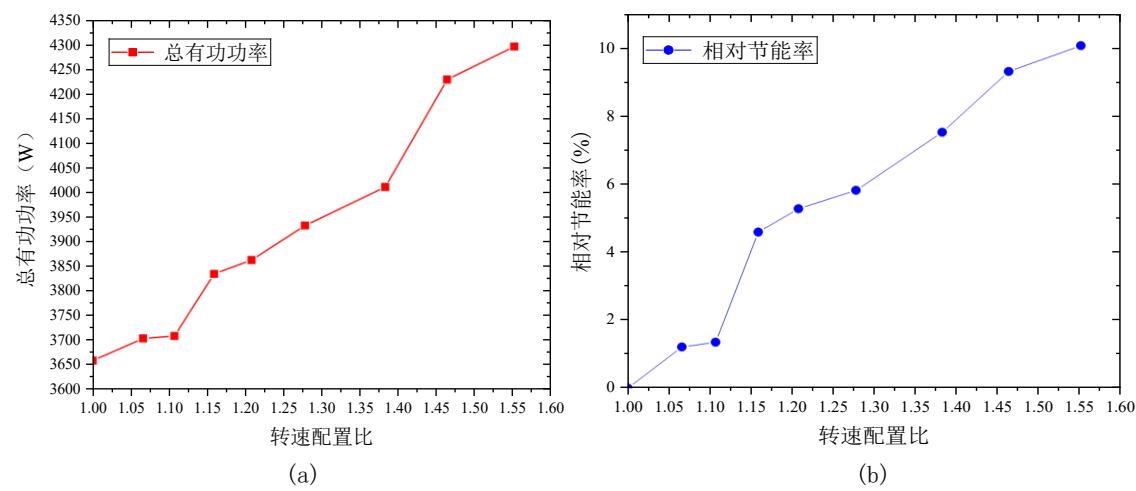


图 5-13 流量为 $30\text{ m}^3/\text{h}$ 时不同转速配置比关系曲线

在流量为 $35\text{ m}^3/\text{h}$ 时，实验记录的数据如表 5-6 所示，包括两台离心泵的输出转速、功率以及总有功功率，定义两台离心泵转速配置之比为 n_1/n_2 ，当转速配置比为 1 时，两台离心泵为同转速运行。

表 5-6 流量为 $35\text{ m}^3/\text{h}$ 时不同转速配置比能耗对比

流量	泵 1 输出 转速 n_1 (rpm)	泵 2 输出 转速 n_2 (rpm)	泵 1 有功 功率 (W)	泵 2 有功 功率 (W)	转速配置比 (n_1/n_2)	总有功功 率 P (W)	相对节 能率 (%)
35	1958	1958	2645	2678	1.000	5323	0.00
	1983	1926	2697	2657	1.030	5354	0.6
	2038	1878	2747	2635	1.085	5382	1.1
	2085	1862	2883	2566	1.120	5449	2.31
	2105	1790	2978	2492	1.176	5470	2.69
	2172	1784	3130	2438	1.217	5568	4.4
	2220	1752	3196	2407	1.267	5603	5.0
	2266	1718	3255	2357	1.319	5612	5.15
	2320	1677	3330	2313	1.383	5643	5.67

根据表中数据，使用 Origin 软件绘制出在不同流量下，转速配置比与输出总功率和相对节能率关系曲线，如图 5-14 所示。在流量为 $35\text{ m}^3/\text{h}$ 时，随着转速配置比的增加，总有功功率在不断增加，相对节能率在不断提高，最高可达到 5.67%，平均节能率为 3.37%。

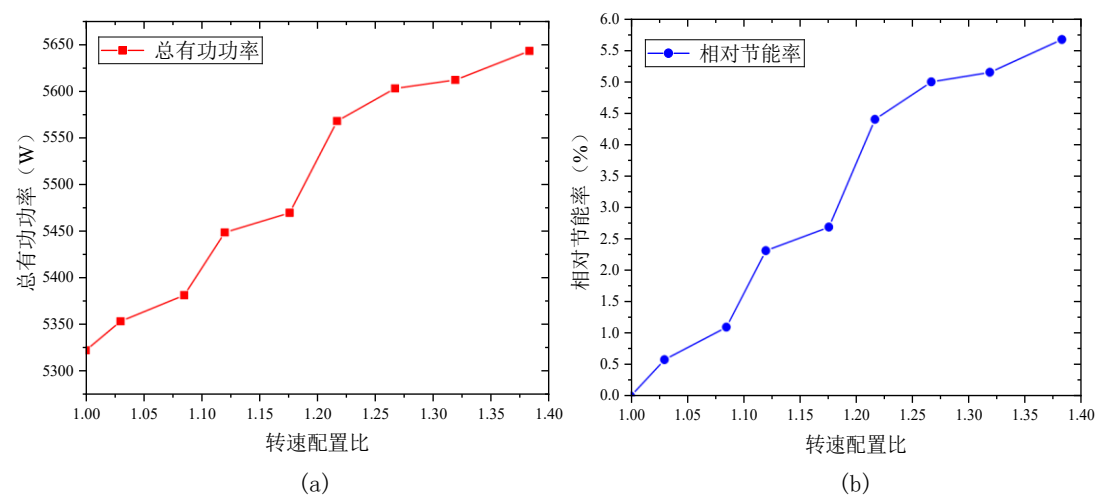


图 5-14 流量为 $35\text{ m}^3/\text{h}$ 时不同转速配置比关系曲线

在流量为 $40\text{ m}^3/\text{h}$ 时，实验记录的数据如表 5-7 所示，包括两台离心泵的输出转速、功率以及总有功功率，定义两台离心泵转速配置之比为 n_1/n_2 ，当转速配置比为 1 时，两台离心泵为同转速运行。

表 5-7 流量为 40m³/h时不同转速配置比能耗对比

流量	泵 1 输出 转速 n_1 (rpm)	泵 2 输出 转速 n_2 (rpm)	泵 1 有 功功率 (W)	泵 2 有 功功率 (W)	转速配置比 (n_1/n_2)	总有功 功率 P (W)	相对节 能率 (%)
40	2236	2236	3179	3266	1.000	6445	0.00
	2383	2206	3297	3247	1.080	6544	1.51
	2438	2188	3327	3225	1.114	6552	1.66
	2485	2162	3383	3186	1.149	6569	1.92
	2522	2082	3451	3169	1.211	6620	2.64
	2595	2059	3516	3105	1.260	6621	2.66
	2636	2041	3589	3046	1.292	6635	2.86
	2672	2018	3680	2967	1.324	6647	3.04
	2705	1977	3768	2933	1.368	6701	3.82

根据表中数据，使用 Origin 软件绘制出在不同流量下，转速配置比与输出总功率和相对节能率关系曲线，如图 5-15 所示。在流量为 40 m³/h 时，随着转速配置比的增加，总有功功率在不断增加，相对节能率在不断提高，最高可达到 3.82%，平均节能率为 2.52%。

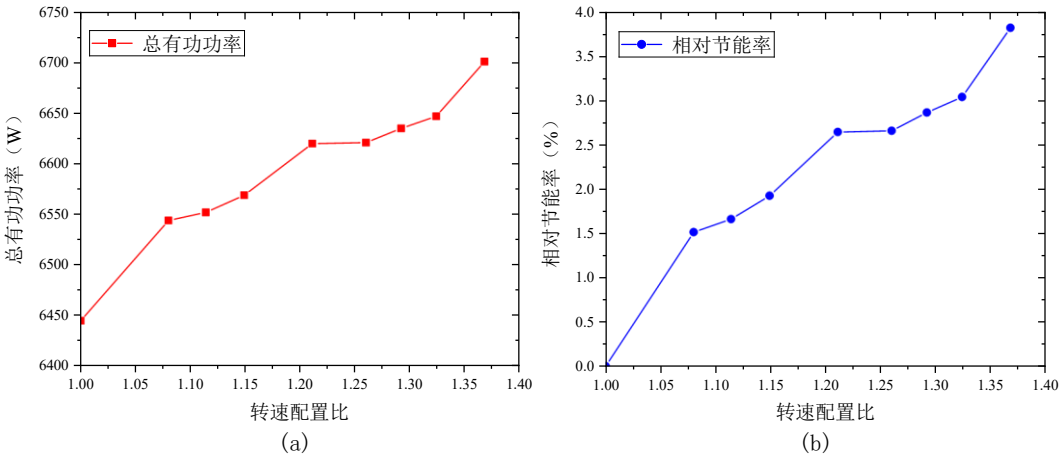


图 5-15 流量为 40m³/h时不同转速配置比关系曲线

在同一流量前提下，并联离心泵消耗的总有功功率随着转速配置比增加呈上升趋势，在配置比为 1 时，并联离心泵所消耗的总有功功率最低，泵站系统最为节能。验证了在同型号离心泵并联运行时，相同转速情况下，泵站系统最为节能。

5.5 本章小结

本章叙述了离心泵负载的节能原理，从离心泵的设计原则和泵的相似定律，确定了转速调节相较于阀门调节更为节能。将永磁调速器应用于泵站系统，采用

永磁调速器调节离心泵的输出转速,通过实验验证了相较于阀门调节和部分离心泵转速调节,泵站系统各台离心泵采取转速调节的运行方式更为节能。在三台离心泵并联运行情况下,转速调节最高节电率约可达 15.7%。通过建立离心泵并联数学模型,推导出同型号离心泵在相同转速运行下最为节能。选取了两台同型号离心泵,在不同流量前提下,记录并联离心泵在不同转速配置比下的各项数据,通过实验验证了同型号离心泵并联运行时,离心泵转速相同系统最为节能。在流量为 $30\text{m}^3/\text{h}$ 工况下,随着转速配置比的增加,相对节能率在不断提高,最高达到 10.08%,为泵站系统的运行方式提供节能研究。

第 6 章 总结与展望

6.1 总结

本课题更贴近实际应用，所设计的模型皆有实物样机，在实际工程应用中具有一定的参考价值。本文对永磁调速器结构进行了设计与研究，采用 Halbach 阵列排布方式替代传统 N-S 排列，在永磁体数量不变的情况下显著提升了输出转矩。将该调速器应用于泵站系统，通过调节离心泵转速来替代传统阀门调节方式，以探究泵站系统的节能潜力，论文的主要研究工作如下：

(1) 泵站系统当前存在的关键问题：采用阀门调节会造成大量能源损耗，为解决泵站系统目前在生产实践中存在的问题，查阅了大量永磁调速器相关文献，了解国内外研究现状。结合永磁调速器的结构优势，基于此，提出一种采用 Halbach 阵列排布方式的永磁调速器，并将其应用于泵站系统进行转速调节。

(2) 介绍了永磁调速器的结构组成和工作原理，并对其各组成部分进行了设计。通过对比 Halbach 阵列与 N-S 排列，Halbach 阵列在同等条件下可将气隙平均磁通密度和输出转矩提高近一倍。

基于 Halbach 阵列，建立了永磁调速器的等效磁路模型，并推导出输出转矩主要受转速差、不同开度和铜环厚度的影响。

(3) 通过有限元方法对永磁调速器的三维磁场进行了仿真分析。基于样机尺寸构建了简化三维模型，并设定了基本参数。重点研究了输出转矩的影响因素，研究表明：在相同开度下，随着转速差的增大，输出转矩呈先上升后下降的趋势，并在转速差为 260rpm 时达到峰值；而损耗功率则随转速差增大持续增加；在相同转速差条件下，输出转矩随开度的增加而显著提升；此外，铜环厚度的增加会增强感应涡流效应，从而提升输出转矩；通过分析转速差、不同开度和铜环厚度对传动特性的影响，为后续实验样机的设计提供了理论依据。

(4) 阐述了循环水厂泵站系统样机的设计与搭建过程。将永磁调速器样机应用于泵站系统，并通过实验获取其运行参数。实验数据与有限元仿真结果的对比表明，采用有限元模拟计算永磁调速器的传动特性具有较高的可靠性，误差控制在 5% 以内，处于工程允许范围内，能够有效缩短设计研发周期。此外，对永磁调速器开度的调节证明了永磁调速器具备良好的传动性能。

(5)描述了离心泵负载的节能原理,从离心泵的设计原则和泵的相似定律,证明了转速调节相较于阀门调节更为节能。将永磁调速器应用于泵站系统,采用永磁调速器调节离心泵的输出转速,通过实验验证了相较于阀门调节和部分离心泵转速调节,泵站系统各台离心泵采取转速调节的运行时最为节能。在三台离心泵并联运行情况下,转速调节最高节电率约可达 15.7%。通过建立离心泵并联数学模型,推导出同型号离心泵同转速调节运行最为节能。选取了两台同型号离心泵,在不同流量前提下,通过实验验证了同型号离心泵并联运行时转速相同最为节能。在输出流量为 $30\text{m}^3/\text{h}$ 情况下,随着转速配置比的增加,相对节能率在不断提高,最高达到 10.08%,为泵站系统的节能优化提供参考依据。

论文的创新点如下:

(1)设计一种使用 Halbach 阵列排布方式的永磁调速器,取代普通 N-S 排列,在保证同等数量的永磁体下,有效提高永磁调速器的输出转矩。通过仿真分析影响永磁调速器传动特性的因素,缩短设计研发周期。实验表明,永磁调速器具有良好的调速性能。

(2)将永磁调速器应用于泵站系统,使用永磁调速技术对离心泵进行一对一调速。相较于传统阀门调节和部分离心泵转速调节,泵站系统各台离心泵采取转速调节的运行方式更为节能。当多台同型号离心泵并联运行时,在满足流量需求的前提下,相同转速调节方式系统最为节能,对泵站系统的运行方式提供节能参考。

6.2 展望

本文设计的永磁调速器为化工等行业的节能提供了一种新的思路,但由于实验条件和作者自身思考的局限性,此设计还存在以下不足:

(1)目前所研究的永磁调速器主要应用于低功率离心泵,对于化工等大型厂区所使用的大型离心泵,考虑能否将永磁调速器尺寸加大并应用于大型离心泵是否同样达到节能效果。

(2)目前的泵站系统还存在不同型号离心泵并联运行,对于应用永磁调速器进行转速调节,未来将考虑能否研究出一种不同型号并联运行方式,使泵站系统更为节能。

参考文献

- [1] 司昌昆.石化企业循环水系统节能优化研究[D].中国石油大学(北京),2020.DOI:10.27643/d.cnki.gsybu.2020.001322.
- [2] 陈文娟.水利泵站节能系统的设计与算法优化研究[D].江苏科技大学,2019.
- [3] Dong W, Dong Y, Sun J, et al. Analysis of the internal flow characteristics, pressure pulsations, and radial force of a centrifugal pump under variable working conditions[J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering, 2023, 47(2): 397-415.
- [4] Yang Z, Soleiman K, Lohndorf B. Energy efficient pump control for an offshore oil processing system[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2012, 45(8): 257-262.
- [5] 陈宏,赖春艳.我国电力能源需求响应发展现状与展望[J].电力与能源,2021,42(01):87-90+122.
- [6] 韩延菲.节能减排约束下行业的经济增长路径与碳减排责任研究[D].西安建筑科技大学,2023.DOI:10.27393/d.cnki.gxazu.2023.000298.
- [7] Vicenzutti A, Chiandone M, Arcidiacono V, et al. Enhanced partial frequency variation starting of hydroelectric pumping units: Model based design and experimental validation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 131: 107083.
- [8] 罗礼培.电机节能技术及其发展趋势[J].上海节能,2017,(08):443-450.DOI:10.13770/j.cnki.issn2095-705x.2017.08.001.
- [9] 曹建兵.永磁涡流调速器磁-热分析与轻量化设计[D].安徽理工大学,2022.DOI:10.26918/d.cnki.ghngc.2022.001104.
- [10] 李科.钻井平台设计建造中离心泵的选型研究[D].大连理工大学,2015.
- [11] 高江华.水泵节能改造浅析[J].冶金动力,2024,(01):44-47.DOI:10.13589/j.cnki.yjdl.2024.01.029.
- [12] 孙中圣,李新泉,李小宁.永磁涡流调速器研究与应用[J].机械制造与自动化,2016,45(03):1-4.DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2016.03.001.
- [13] 郭昀朋.液力耦合器电动给水泵变频改造技术应用研究[D].华南理工大学,2018.
- [14] 何胜,林强.浅谈液力耦合器渗漏及处理[J].中国设备工程,2023,(11):7-9.
- [15] 莫达.矿井多风机联合运转按需变频调风技术研究[D].中国矿业大学,2022.DOI:10.27623/d.cnki.gzkyu.2022.002233.
- [16] 刘欣.变频器谐波危害分析及解决措施[J].现代建筑电气,2013,(S1):209-212.DOI:10.16618/j.cnki.1674-8417.2013.s1.109.
- [17] 刘天涯.变频器在使用中遇到的问题和故障防范[J].电子测试,2020,(24):117-118.DOI:10.16520/j.cnki.1000-8519.2020.24.050.
- [18] 李振晔.浅谈变频器在高校节能应用中遇到的问题及对策[J].现代职业教育,2016,(21):47.
- [19] Wang J ,Wang D ,Wang S , et al.A Review of Recent Developments in Permanent Magnet Eddy Current Couplers Technology[J].Actuators,2023,12(7):

- 277.
- [20]李毅搏.新型永磁调速器解析建模与电磁特性分析研究[D].东南大学,2019.DO I:10.27014/d.cnki.gdnau.2019.004037.
- [21]Sagawa M, Fujimura S, Togawa N, et al. New material for permanent magnets on a base of Nd and Fe (invited)[J]. Journal of Applied Physics, 1984, 55(6):2083-2087.
- [22]Wallace A, Wohlgemuth C, Lamb K. A high efficiency, alignment and vibration tolerant, coupler using high energy-product permanent magnets[C]//1995 Seventh International Conference on Electrical Machines and Drives (Conf. Publ. No. 412). IET, 1995: 232-236.
- [23]何富君,仲于海,张瑞杰,等.永磁涡流耦合传动特性研究[J].机械工程学报,2016, 52(08):23-28.
- [24]Wallace A, Jouanne A V. Industrial speed control: are PM couplings an alternative to VFDs[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2001, 7(5): 57-63.
- [25]Canova A, Vusini B. Design of axial eddy-current couplers[J]. IEEE Trans. Ind. Appl, 2003. 2003, 39(3): 1725-1733.
- [26]Canova A, Vusini B. Analytical modeling of rotating eddy-current couplers [J]. IEEE Trans. Magn, 2005, 41(1): 24-35.
- [27]Lubin T, Mezani S, Rezzoug A. Simple analytical expressions for the force and torque of axial magnetic couplings[J]. IEEE Trans. Energy Convers, 2012, 27(2): 536-546.
- [28]Mohammadi S, Mirsalim M, Vaez-Zadeh S. Nonlinear Modeling of Eddy-Current Couplers[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(1): 224-231.
- [29]Aberoomand V, Mirsalim M, Fesharakifard R. Design Optimization of Double-Sided Permanent-Magnet Axial Eddy-Current Couplers for Use in Dynamic Applications[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, (99): 1-1.
- [30]Shin K H, Park H I, Cho H W, et al. Semi-three -dimensional analytical torque calculation and experimental testing of an eddy current brake with permanent magnets [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(3): 1-5.
- [31]Belguerras L, Mezani S, Lubin T. Analytical Modeling of an Axial Field Magnetic Coupler with Cylindrical Magnets[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2021,57(2 Pt.1):8000305-1-8000305- 5.
- [32]苏彦宏,张泽惠.磁传动技术的发展和应.甘肃科技.2004,20(8):82~86.
- [33]杨志轶,赵韩.轴向磁性联轴器轴向力与传动力矩计算及其特性分析[J].磁性材料及器件,2001,32(6):22-26.
- [34]杨超君,蒋生发.电磁感应式磁力联轴器的实验研究[J].排灌机械,2004(06):5-8.
- [35]王金博.永磁调速器建模与优化设计研究[D].东北大学,2011.
- [36]袁丹青,李建萍,张贺等.Halbach 阵列磁力联轴器传动转矩的数值计算[J].排灌

- 机械工程 学报,2011,29(03):209-213.
- [37] 王旭,王大志,刘震,等.永磁调速器的涡流场分析与性能计算[J].仪器仪表学报, 2012,33(01):155-160.DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.2012.01.023.
- [38] 葛研军,聂重阳,辛强.调制式永磁齿轮气隙磁场及转矩分析计算[J].机械工程学报,2012,48(11):153-158.
- [39] 孙中圣,周丽萍,王向东,等.筒式永磁调速器的磁场分析与特性研究[J].中国机械工程,2015, 26(13):1742-1747.
- [40] 李延民,李申,邵志恒.软启动永磁涡流联轴器的设计与参数分析[J].中国机械工程,2015,26(14):1894-1899.
- [41] 时剑文,王泽路,孙珂,等.矿用永磁耦合器涡流损耗及温度场分析[J].煤矿安全, 2017,48(10):101-104+107.DOI:10.13347/j.cnki.mkaq.2017.10.027.
- [42] 陶前程,林鹤云,李毅搏,等.新型聚磁式永磁涡流耦合器及其电磁特性分析[J].东南大学学报(自然科学版),2018,48(06):1164-1169.
- [43] 吴明,马玉顺,匡俊,等.盘式永磁调速器在离心负载下的调速性能[J].机械工程学报,2019,55(14):225-232.
- [44] 王成龙.筒式永磁涡流调速器不对中时的传动性能研究[D].南京理工大学,2020.DOI:10.27241/d.cnki.gnjgu.2020.001530.
- [45] Wang J. A Generic 3-D Analytical Model of Permanent Magnet Eddy Current Couplings Using a Magnetic Vector Potential Formulation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, PP(99):1-1.
- [46] 邸子瑞.平山电厂浆液循环泵永磁调速器改造与研究[D].中国矿业大学,2023. DOI:10.27623/d.cnki.gzkyu.2023.001371.
- [47] Zhang H, Liu C, Zhang S, et al. Analysis and design optimization of axial-radial flux hybrid excitation permanent magnet eddy current coupling[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2023, 18(6): 4231-4244.
- [48] Xikang C, Wei L, Yang Z, et al. A concise transmitted torque calculation method for pre-design of axial permanent magnetic coupler[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(2): 938-947.
- [49] Asadi M, Ahmadi R, Abazari A M. Halbach magnet arrays in electromagnetic kinetic energy harvesters: A review[J]. Energy Conversion and Management: X, 2024: 100544.
- [50] Naoe N, Imazawa A. Research of a core-less linear machine with applied Halbach array for low speed application[J]. COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, 2018, 37(5): 1795-1804.
- [51] Cheng G, Song D. Research on transmission characteristics of sleeve type electromagnetic hybrid governor[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2024 (Preprint): 1-14.
- [52] Lee Y K, Bang T K, Jo S T, et al. Electromagnetic and Mechanical Analysis and Measurements of Interior Permanent Magnet Motors Based on Equivalent Magnetic Circuit Method[J]. Machines, 2022, 10(10): 915.
- [53] 程刚,曹建兵,宋东华,等.永磁涡流调速器计算分析与实验[J].煤矿机电,2022,43

- (06):1-5+30.DOI:10.16545/j.cnki.cmet.2022.06.001.
- [54]朱永隆.面向大功率循环水泵的移动式永磁调速系统设计[D].安徽工程大学,2023.DOI:10.27763/d.cnki.gahgc.2023.000492.
- [55]Wang Z L. Maxwell's equations for a mechano-driven, shape-deformable, charged-media system, slowly moving at an arbitrary velocity field $v(r, t)$ [J]. Journal of Physics Communications, 2022, 6(8): 085013.
- [56]Li B L ,Chen T ,Li X W .Analysis of the air gap magnetic field in cylindrical magnetic couplings based on mathematical and finite element approach.[J].Scientific reports,2024,14(1):27067.
- [57]Neyman A L ,Neyman Y V ,Elanakova A V .Dynamic model of the electromagnetic oscillating system with energy losses[J].Journal of Physics: Conference Series,2019,1333(5):052022-052022.
- [58]Szelag W, Jedryczka C, Baranski M, et al. Design, Analysis and Experimental Verification of a Coreless Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Energies, 2024, 17(7): 1664.
- [59]李祥.Halbach 阵列双筒永磁调速器设计[D].淮阴工学院,2023.DOI:10.27944/d.cnki.ghygy.2023.000103.
- [60]Feng L ,Liu W ,Ding Y , et al.Optimal Design and Analysis of High-Speed Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Genetic Algorithm and TOPSIS Method[J].Journal of Electrical Engineering & Technology,2024,(pre publish):1-11.
- [61]崔中胜.Halbach 型复合式磁力耦合器传动特性研究及优化设计[D].安徽理工大学,2024.DOI:10.26918/d.cnki.ghngc.2024.001294.
- [62]王辰昊.并联离心泵组的多目标优化控制研究[D].中北大学,2020.DOI:10.27470/d.cnki.ghbgc.2020.000218.
- [63]黄李泽.恒压供水系统能效优化控制策略的研究[D].广东工业大学,2021.DOI:10.27029/d.cnki.ggdgu.2021.001633.
- [64]Li Z ,Dong W ,Zhou C , et al.Study on the internal flow evolution mechanism and pressure pulsation characteristics of the transient process of variable speed regulation of centrifugal pump[J].Journal of Physics: Conference Series,2024,2854(1):012054-012054.
- [65]李易果.工业循环水系统的变频操作优化方法[D].中国石油大学(北京),2023.DOI:10.27643/d.cnki.gsybu.2023.000490.
- [66]Manickavel B ,Raja R S .AI Energy Optimal Strategy on Variable Speed Drives for Multi-Parallel Aqua Pumping System[J].Energies,2022,15(12):4343-4343.
- [67]Wu Y, Guo X, Li G, et al. Analysis of shaft power of centrifugal pump under variable speed condition[C]//2017 12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). IEEE, 2017: 248-252.
- [68]Yuan Y ,Junejo R A ,Wang J , et al.Unsteady Flow Behaviors and Vortex Dynamic Characteristics of a Marine Centrifugal Pump under the Swing Motion[J].Machines,2024,12(10):687-687.

- [69]王丙.基于能效优化的二次供水控制系统设计与实现[D].华中科技大学,2020.
DOI:10.27157/d.cnki.ghzku.2020.002833.
- [70]Kim Y J, Norford L K, Kirtley J L. Modeling and analysis of a variable speed heat pump for frequency regulation through direct load control[J]. IE EE Transactions on Power Systems, 2014, 30(1): 397-408.
- [71]Fatholahzadeh S, Jafarpour M H, Nasiri S. Applying the Lagrange multiplier technique to reconstruct a force-free magnetic field[J]. Astronomy & Astrophysics, 2023, 676: A120.
- [72]王轩.并联泵组变频恒压供水系统能效控制策略研究与实现[D].华中科技大学,2019.DOI:10.27157/d.cnki.ghzku.2019.001060.

攻读学位期间的科研成果目录

专利发表情况：

- (1) 汪杰，徐曼曼等. 磁力测试装置[P]. 中国专利：ZL 2023 2 0268817.1.
(实用新型专利授权)
- (2) 徐曼曼，汪杰等. 一种新型永磁调速器散热密封装置[P]. 中国专利：
ZL118137705A (发明专利实审)

比赛获奖情况：

- (1) 全国三维数字化创新设计大赛 国家级 三等奖
- (2) 安徽省大学生节能减排社会实践与科技竞赛 省部级 一等奖

致谢

行文至此,也就意味着我的研究生三年的学习生活即将落幕,在这一阶段里,我的学习能力和专业素养成长了很多,对于即将进入社会的我,也变得不再恐慌,反而非常从容淡定,更加沉稳淡定。在此,我谨向所有给予我帮助的室友、同门、老师和家人表达最诚挚的谢意。

首先,我要由衷地感谢我的导师徐曼曼副教授,在我刚进入课题组时对学术懵懵懂懂,是徐曼曼导师在我迷茫时为我指点迷津,引领我进入学术课题,无论是仿真模拟、实验研究还是专利撰写,都给予我极大的帮助,徐曼曼导师通过自身的言传身教让我明白一位优秀的导师不仅是学术上的引路人,更是人生道路上的灯塔,教会我如何以严谨的态度对待生活,以坚韧的精神克服遇到的困难。

其次,我要感谢校外导师王向东高级工程师,王向东导师不仅为我提供实验装置和场地,还为我提供良好的实习机会。让我深刻体会到了理论与实践相结合的重要性,我相信这些宝贵的经验将为我未来的职业发展奠定坚实的基础。同时,我要感谢课题组的全体成员及 613 寝室室友,在论文修改过程中为我提供的宝贵建议和无私帮助,通过交流与合作让我少走了很多弯路,也体会到团队的力量远大于个人的单打独斗,只有相互支持与共同努力,才能实现更大的目标。

最后,我要感谢我的家人及对象张倩,感谢你们一直以来对我的理解、支持和鼓励。你们的爱与关怀是我不断前行的动力源泉,让我在遇到困难时能够坚定信念、勇往直前。

在此表示感谢,并致以我内心深处最诚挚的谢意。

尚德敏学 唯实惟新

