电 子 科 技 大 学

专业学位研究生学位论文开题报告表

攻读学位级别： □博士 √□硕士

培养方式：□全日制 √□非全日制

专业学位类别及领域： 机械工程

学 院： 机械与电气工程学院

学 号： 202052040730

姓 名： 施杰越

论文题目： 新型电隔离预应力锚固体系

性能研究

校内指导教师： 李坚 教授

校外指导教师： 邹易清

填表日期： 2021 年 12 月 18 日

电子科技大学研究生院

1. 学位论文研究内容

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 课题类型 | | □应用基础研究 □应用研究 |
| 课题来源 | | □纵向 □横向 □自拟 |
| 学  位  论  文  研  究  内  容 | 学位论文的研究目标、研究内容及拟解决的关键性问题（可续页）  **1. 研究目标**  预应力混凝土结构极易受到来自周围环境的氯化物、杂散电流、金属溶解电解质、材料的氢脆、微动疲劳、电接触等方面的影响发生腐蚀，如何提升结构内部的防护效果并对健康状况进行监测是目前预应力领域研究的重点。电隔离筋(EIT)预应力防护技术不仅能对结构内部起到良好的密封防护效果还能对预应力管道内部的健康状况进行长期监测，但是该技术的研究和应用在国内属于空白，为了提升预应力混凝土结构的耐久性水平并对结构内部质量进行把控，同时为国内电隔离防护技术的后续研究提供参考，本课题开展新型电隔离预应力锚固体系的相关研究，主要的研究目标为：依托柳州OVM公司平台，结合国外现有电隔离锚固体系，设计开发出一套新的电隔离预应力锚固体系，通过相关性能验证后能够适用于工程应用。  **2. 研究内容**  本论文研究内容主要为以下几个部分：  **[1].预应力混凝土结构腐蚀机理和电隔离防护原理分析**  国内外已经有很多关于预应力筋腐蚀原因分析的研究，在对预应力筋进行防护之前需要分析其腐蚀原因和过程。本论文通过查阅国内外相关文献，得到预应力构件遭受周围环境的氯化物、杂散电流的侵蚀机理；提取影响预应力构件腐蚀进展的关键特征参量，为电隔离防护体系的建立提供依据。  电隔离技术作为解决预应力筋腐蚀防护的有效方案，已经被瑞士和意大利等欧洲国家写入相关技术标准中，同时关于电隔离体系应用的工程案例也被记录，但是国内对于电隔离防护技术的研究很少，本论文通过查阅国外电隔离预应力体系相关技术标准和工程案例，对电隔离防护原理进行分析，提炼电隔离体系对预应力筋防护的关键要素；通过对市场上现有的密封防腐产品进行调研，结合国外现有电隔离体系，确定适用于电隔离锚固体系的密封绝缘方案；建立电隔离预应力体系等效电路模型，为电隔离监测提供理论依据。  **[2].电隔离体系关键组件结构设计和分析**  常规锚固体系下预应力筋得不到很好的腐蚀防护，预应力筋受到管道内部和外部环境的影响导致腐蚀最终预应力失效，并且在施工前后很难对预应力管道内部的情况进行检查，很难及时对公路桥梁的健康状况做出评估。随着fib标准PL3防护级别的提出，更是将其作为预应力锚固体系的工程验收标准，只有满足对预应力筋有良好防护效果以及具备长期健康状况监测系统的预应力锚固体系才能满足要求通过工程验收。显然，常规锚固体系已经不能满足PL3级别的标准，因此需要设计新的预应力锚固体系。电隔离防护技术的出现提供了解决的方案，相较于常规锚固体系，电隔离体系在其基础上增加了新的密封防腐组件和绝缘组件，同时对密封效果起关键作用的锚具连接部分的结构进行改进，形成一套密封性能和绝缘性能良好并且拥有预应力筋健康状况长期监测系统的电隔离锚固体系。  本论文对电隔离锚固体系的设计主要包括：通过SolidWorks三维建模软件对电隔离体系锚具和关键连接组件进行结构设计，并通过ANSYS有限元分析软件对锚具进行力学仿真分析和计算，模拟预应力筋工作状态下锚具的受力情况；结合国外现有研究成果，进行密封防腐组件的材料选取和结构设计和分析。  **[3]. 电隔离预应力锚固体系性能验证**  研究电隔离预应力锚固体系的电隔离性能，主要通过电反馈的方式测量结构内部的阻抗值验证工作状态下预应力筋是否受到周围环境的影响。从理论分析和实验方面验证预应力孔道的几何特征（如长度、直径）、不同载荷、激励信号的频率、内外温湿度变化，非金属制品的握裹性能等对监测值的影响；通过实验与理论研究相结合，建立各影响因素和预应管道内部健康状况之间的数学模型。  **3. 拟解决的关键性问题**  **[1].隔离垫的设计问题**  隔离垫一方面需要承载传递力，另一方面需要具有一定的电绝缘性能，因此，必须对绝缘耐压材料进行压-电实验，将不同材料间的压力与电反馈相互变化关系联系起来，本研究的关键在于建立压-电模型。首先，考虑材料稳定性，抗压性，绝缘性能等方面，有针对性的筛选材料进行压-电实验；其次对筛选后绝缘材料进行研究，分析材料、厚度、测试频率与施加载荷的电反馈值分布情况，并选取符合要求的材料进行分析，并建立压-电模型。  **[2].锚具和连接组件之间的密封问题**  良好的密封性能决定了电隔离体系的防护是否有效，在新型电隔离体系中，锚具和组件之间的连接和装配方式都会影响到最终的密封防护效果，在满足结构强度和电隔离性能的前提下，如何为结构选择合适的材料并进行结构设计是实现电隔离的基础。  **[3].环境因素对电隔离监测影响**  由于电隔离测量的阻抗值对环境温度和湿度都十分敏感，因此测量值可能受到不同环境条件的影响，如何修正测量值与预应力筋健康状况之间的数学关系模型，提高模型的精度也是研究的难点。 | |

1. 学位论文研究依据

|  |
| --- |
| 学位论文的选题依据和研究意义，国内外研究现状和发展态势；选题在理论研究或实际应用方面的意义和价值；主要参考文献，以及已有的工作积累和研究成果。（2000字）  **1. 选题依据和研究意义**  预应力混凝土结构作为桥梁、铁路、核安全壳、LNG储罐等大型基础设施的主要受力部件，由于其采用较高强度等级的混凝土以及预应力筋拥有多道保护层体系，因此曾被认为具有优良的耐久性能，然而现实情况并非如此乐观，构成预应力混凝土结构中的锚具和预应力筋均为金属件，极易受到来自周围环境的氯化物、杂散电流、金属溶解电解质、材料的氢脆、微动疲劳、电接触等方面的影响[1]，良好的保护层体系对预应力筋的腐蚀只能起到延缓作用而并不能起到阻止作用，腐蚀介质穿过保护层体系（包括腐蚀透金属波纹管）只是一个时间问题[2]。而这种延缓作用并不能完成许多预应力工程承载的“百年大计”之使命；更为甚者，后张预应力混凝土结构还存在着灌浆质量无法保证（包括先进的真空辅助灌浆工艺）这一关键问题，这使得即使在塑料波纹管体系中也有可能会发生预应力筋的腐蚀问题[3]。  随着人类活动空间不断拓展，需要在恶劣环境中服役的工程结构日益增多。各国已建、在建和将建的跨海大桥、海底隧道、海港码头以及沿海地区、除冰盐地区兴建的高速铁路、高速公路、桥梁、工业建筑等重大工程都广泛采用预应力混凝土结构，这些工程具有大（大跨、大型）、高（高层、高耸）、特（特种）这几个特点，而且投资大，使用要求高，社会影响广泛，因而结构需要具有更高的耐腐蚀性能和防护水平，如杭州跨海湾大桥和胶州跨海大桥的设计使用寿命均为100年，而港珠澳大桥的设计使用寿命更是高达120年，这使得预应力混凝土结构的耐久性面临巨大挑战[3-5]。  预应力混凝土结构腐蚀检测手段大部分能在实验室环境下进行，但是实地应用效果却不好，而且腐蚀检测虽然能对及时发现结构内部的情况，但是这些方法都不适用于长期的监测，很难做到对结构的耐久性的长期监测和质量把控。需要注意的是，腐蚀防护和检测同样重要，但是目前的腐蚀防护方案都是防护和检测相互独立的，考虑了防腐就不考虑检测腐蚀，很难在拥有良好防护效果的同时兼顾对健康状况长期监测的功能。  为了防止杂散电流以及侵蚀介质对预应力筋的腐蚀，并对内部结构的腐蚀和灌浆情况进行监测，一种“电隔离力筋（Electrically Isolation Tendons，EIT）”应运而生，其防腐基本思路是：采用塑料波纹管成孔以保证力筋长度范围内的绝缘与密封，然后在力筋两端锚头部位进行专门的绝缘与密封处理，并使整个预应力筋与锚头体系的绝缘与密封保持连续，该锚固体系兼顾预应力管道内部灌浆情况和预应力筋健康状况在线监测系统，2004年苏黎世COST534会议对这种技术的背景、原理、技术方案以及工程应用进行了报道[6-8]。  综上所述，预应力混凝土结构由于腐蚀引起的耐久性问题不仅是存在的，而且是严峻的；常规的锚固体系和防护检测手段不能满足实际应用要求，因此，开展电隔离预应力锚固技术的研究，提升结构抗腐蚀性能并对其健康状况进行长期监测，对确保重大土木工程结构全寿命使用安全，推动混凝土结构理论与技术应用，实现经济社会绿色、可持续发展具有重要意义。  **2. 国内外研究现状和发展态势**  **4.1、国内电隔离防护技术研究现状**  从电隔离防腐结构上讲，国内电隔离型锚具结构主要有两种形式，一种为复合型锚垫板+塑料波纹管。朱万旭、周红梅[9-11]等人采用传统的金属波纹管孔道锚固体系与OVM.M15ZH型电绝缘型锚固体系的动态电阻值进行长期监测对比试验。试验结果表明；传统的金属波纹管孔道锚固体系的动态电阻值基本保持不变，OVM.M15ZH型电绝缘型锚固体系的动态电阻值则随着时间的推移呈上升趋势。  图4-1 电隔离锚具结构图  1.塑料波纹管2.塑料喇叭管3.预应力筋4.铸铁锚垫板5.绝缘垫  6.塑料锚罩7.浆体8.无收缩混凝土9.导线10.锚板  另一种采用非金属材料将整个预应力筋锚固区与混凝土隔离开，两种结构的都是建立一个密闭、完全独立的结构。如1图所示，通过塑料波纹管1、塑料喇叭管2、绝缘垫5、塑料锚罩7将整个预应力孔用非金属部件隔离开，对孔道类的预应力筋7形成隔离层，防止被侵蚀[12]。  **4.1、国外电隔离防护技术研究现状**  早在1981年，MorrisSchupack等人发现通过封装的方式将预应力锚具结构与混凝土结构相隔离，形成独立的体系有利于隔离开外界对预应力钢材的腐蚀，并提出电隔离（Electrically Isolated）概念[13]。  2000年国际结构混凝土协会（fib），在技术报告《fibbulletin7》中针对塑料波纹管在后张预应力混凝土中的应用，提出一系列的测试方法和准则，并通过摩擦系数、水密性、孔道灌浆试验、电阻测试等实验进行性能验证，试验结果表明：采用塑料波纹管能够提高预应力筋腐蚀防护能力，降低预应力筋摩擦系数，为预应力筋腐蚀防护提出新的要求[14]。  2005年国际结构混凝土协会根据预应力体系的耐腐蚀能力划分为三种体系：PL1——传统的金属孔道、PL2——塑料波纹管孔道、PL3——塑料波纹管与电绝缘锚具相结合（EIT）。《fibBulletin33》中指出对于在PL1体系中预应力筋易受到的6大因素的腐蚀：（1）来自周围环境的氯化物（氯离子）；（2）杂散电流（直流电）；（3）金属溶解电解质；（4）材料的氢脆；（5）微动疲劳；（6）电接触[15]。    图4-2 fib预应力耐腐蚀性能体系  从绝缘垫耐压性能上讲，对于绝缘垫材料采用环氧或酚醛树脂、玻璃纤维等材料层压而成，具有良好的力学性能、电绝缘性能、耐电弧性、阻燃、耐高温等性能。产品主要应用于国家电气、电工、军工、交通、航天等领域，通常作为电气绝缘材料使用[16]。  从电隔离后张预应力防腐原理上讲，目前，研究电隔离后张预应力混凝土防腐，所采用的结构方式是在预应力混凝土中建立一个密闭、完全独立的结构，通过LCR表测试（如3左所示）相对独立、密闭的预应力筋与混凝土结构中结构筋间的电阻值，判断预应力筋是否有受到腐蚀的危险，同时进行长期监测。图3右图中Ch、Rh、Rd分别表示孔道为纯电容，没有腐蚀破坏的高电阻、腐蚀破坏后有低电阻[17]。  {Vedova, 2006 #205}  图4-3 LCR表的测试方法与测试原理  从监测预应力混凝结构的电隔离性能上讲，2014年国际结构混凝土协会（fib），在技术报告《fibbulletin75》中判断预应力筋是否有受到腐蚀的危险进行说明：在监测期间电阻值非常高，这意味着预应力筋受到保护，处于完全封装的状态；一旦发现电阻值低的时候，这意味着混凝土中的预应力筋已处于缺乏保护的状态；如果所测得的电阻值等于或接近零值。  2002年发布欧洲规范《ETAG013Post-tensioningKitsforPrestressingofStructures》中对混凝土中电隔离筋有明确的测试方法与要求。要求测试相预应力筋与混凝土结构中结构筋间的电阻值不小于1kilo-Ohm[18]。  《Swiss Guideline（2001）》规定了动态电阻临界检测值R=500kΩm，损失因子D<0.1，1米长的部分波纹管电容值C的测量值在2.34±0.04nF/m，不考虑孔洞的存在。《Swiss Guideline（2007）》重新作出调整，定义了电隔离后张预应力结构中三个限制值：监测、疲劳和夹杂电流的电阻值，电阻R＞20Ω，则说明预应力筋与混凝土中钢筋不接触，不存在微动疲劳；R=50kΩm，建议作为临界值进行长期监测；当结构中存在杂散电流，则监测的电阻值R不应该小于150kΩm。  M.DellaVedova[21]等人通过在锚具内建立一个封装的结构，建立一个初期保护系统，构建电绝缘预应力锚固体系，防止含有氯离子的水的侵蚀。在瑞士和意大利高速铁路中将电绝缘预应力锚固体系做出了有益的尝试应用，通过监测，取得了较好的成果。  B.Elsener针对《fibBulletin33》中PL3（电绝缘锚固体系）体系进行研究表明：电隔后张预应力体系对混凝土的质量控制是一种有效的方法[19]。  **3. 实际应用意义和价值**  随着人类活动空间不断拓展，需要在恶劣环境中服役的工程结构日益增多。各国已建、在建和将建的跨海大桥、海底隧道、海港码头以及沿海地区、除冰盐地区兴建的高速铁路、高速公路、桥梁、工业建筑等重大工程都广泛采用预应力混凝土结构，这些工程结构面临恶劣侵蚀环境的同时也需要具有更高的耐腐蚀性能和防护水平，因此开展新型电隔离预应力锚固体系性能的研究，提升结构的耐久性水平并对其健康状况进行长期监测，对确保重大土木工程结构全寿命使用安全，推动混凝土结构理论与技术应用，实现经济社会绿色、可持续发展具有重要意义。  **4. 参考文献**  **5. 已有研究成果**  **[1].完成新型电隔离体系的三维模型**  结合国外现有电隔离防护体系以及OVM公司现有预应力常规锚固体系，设计出了新型电隔离预应力锚固体系，如图所示  **[2].良好的设计平台和试验环境** |

1. 学位论文研究计划及预期目标

|  |
| --- |
| 1.拟采取的主要理论、研究方法、技术路线和实施方案（可续页）  **1. 主要理论和研究方法**  本研究相关的理论主要包括锚固-接触力学、金属腐蚀机理、非线性有限元的数值计算方法、预应力锚具试验、工程试验和实际工程设计理论等。主要研究方法为  **2. 技术路线和实施方案** |
| 2.研究计划可行性，研究条件落实情况，可能存在的问题及解决办法（可续页）  **1. 可行性分析**  本论文的可行性主要分为以下几点:  [1] 对于安全平衡的研究，前期已经进行了大量的数据测试，包括正常人行走，正常人或截瘫患者穿戴外骨骼行走等，有一定的实验数据支撑，并且在安全平衡方面也进行了大量的调研，具有迫切的需求，具有可靠的理论基础。  [2] 团队对下肢外骨骼机器人的研究积累了多年，在实现了基本行走功能的基础上，可以提供对于安全平衡的数据采集环境，添加感知环境的传感器，提供所需的外骨骼机器人，确保数据采集，指标评估等实验顺利进行。  [3] 目前团队积累了许多的医疗合作资源，可以提供符合穿戴条件的受试者，进行实际的临床分析，数据采集。  综上所述，关于下肢外骨骼人机系统安全平衡的研究可以顺利进行。  **2. 研究条件落实**  目前，电子科技大学机器人研究中心外骨骼机器人团队拥有多代自主研发的下肢外骨骼助行系统，拥有 VICON 运动捕捉系统、外骨骼测试平台、动力学分析设备，可以进行平衡指标的研究与验证，下一代外骨骼机器人预计增加脚底压力、姿态仪、测距元件等多种传感器，对于指标在实际系统上的应用提供数据来源，以及应用条件。同时，团队还有国内外多所大学有频繁的学术交流活动，整体学术氛围浓厚。此外，团队还与多家医院及医疗机构（电子科技大学校医院、华西医院、四川省康复医院、成都军区总医院、成都顾连康复医院等）建立了长期合作关系，可以顺利开展临床应用研究。  **3. 可能存在的问题及解决办法**  问题一：人机系统平衡机理与人体平衡相去甚远  解决办法：由于人机系统需要使用拐杖来保持平衡，在支撑结构上介于双足和四足之间，为了解决这个问题，可以设计出符合人机系统模型的同时，借鉴双足和四足的研究方式，在模型上进行更多的尝试，为了减轻人机对拐杖的依赖，主要支撑仍应为腿部，拐杖则类似于前肢又不同于前肢，主要进行力学上的分析。  问题二：人机平衡指标难以界定  解决办法：在充分了解人机平衡机理的基础上，尽可能多的尝试各种指标在人机系统上的可行性，并在此基础上，对指标进行改进使其更适应于人机系统。 |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **3.研究计划及预期成果** | | |
| 研  究  计  划 | 起止年月 | 完成内容 |
| 2021.12-2022.1 | 查阅国外电隔离防护技术相关文献和标准 |
| 2022.2-2022.4 |  |
| 2022.5-2022.8 |  |
| 2022.9-2022.11 |  |
| 2022.12-2023.3 | 撰写毕业论文 |
|  |  |
| 预  期  创  新  点  及  成  果  形  式 | 1. 预期创新点    2. 成果形式 | |

1. 开题报告审查意见

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 1. 导师对学位论文选题和论文计划可行性意见，是否同意开题：  校内导师（组）签字： 年 月 日  校外导师签字： 年 月 日 | | | |
| **2.开题报告考评组意见** | | | |
| 开题日期 |  | 开题地点 |  |
| 考评专家 |  | | |
| 考评成绩 | 合格 票 基本合格 票 不合格 票 | | |
| 结 论 | □通过 □原则通过 □不通过  **通过：**表决票均为合格  **原则通过：**表决票中有1票为基本合格或不合格，其余为合格和基本合格  **不通过：**表决票中有2票及以上为不合格 | | |
| 考评组对学位论文的选题、研究计划及方案实施的可行性的意见和建议： | | | |
| 考评组签名：  年 月 日 | | | |
| **3.学院意见：** | | | |
| 负责人签名： 年 月 日 | | | |

[1] Taerwe L, Matthys S. Fib model code for concrete structures 2010 [Z]. Ernst & Sohn, Wiley. 2013

[2] Salas R M, Schokker A J, West J S, et al. Corrosion risk of bonded, post-tensioned concrete elements [J]. PCI journal, 2008, 53(1): 89.

[3] 李富民, 邓天慈, 王江浩, et al. 预应力混凝土结构耐久性研究综述 [J]. 建筑科学与工程学报, 2015, v.32;No.113(02): 1-20.

[4] 卫军, 张萌, 董荣珍, et al. 重载铁路桥梁服役性能评估 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2012, v.40;No.354(12): 103-6.

[5] 牛荻涛, 孙丛涛. 混凝土碳化与氯离子侵蚀共同作用研究 [J]. 硅酸盐学报, 2013, v.41;No.293(08): 1094-9.

[6] Elsener B. Electrical isolation as enhanced protection for posttensioning tendons in concrete structures (PL 3) [J]. NDT assessment and new systems in prestressed concrete structures, 2004.

[7] Della Vedova M, Evangelista L. Protection against corrosion and monitoring of posttensioning tendons in prestressed concrete railway bridges in Italy [J]. NDT assessment and new systems in prestressed concrete structures, 2004.

[8] Elsener B. Experience with electrically isolated tendons in Switzerland [J]. NDT assessment and new systems in prestressed concrete structures, 2004.

[9] 朱星, 朱万旭, 周红梅. 新型高性能混凝土复合锚垫板的性能研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2011, (8): 35-7.

[10] 刘平伟. 30 米 T 梁后张预应力耐久性监测系统试验研究 [D]; 广西工学院, 2011.

[11] 朱星. 电绝缘后张法预应力筋的健康监测研究 [D]; 广西工学院, 2012.

[12] Della Vedova M, Elsener B. Enhanced durability, quality control and monitoring of electrically isolated tendons; proceedings of the Proc 2nd International fib congress, F, 2006 [C].

[13] Schupack M, Suarez M G. Electrically isolated reinforcing tendon assembly and method [Z]. Google Patents. 1982

[14] du Beton F I. Corrugated Plastic Ducts for internal bonded post-tensioning [J]. Bulletin, (7).

[15] du béton F. Durability of Post-tensioning Tendons: Recommendation [M]. International Federation for Structural Concrete (fib), 2006.

[16] 曹雯, 宋倩文, 申巍, et al. 环氧/纸复合材料直流耐压寿命模型的估计方法 [J]. 电工技术学报, 2019, 34(18): 3750-8.

[17] Della Vedova M, Elsener B, Evangelista L. Corrosion protection and monitoring of electrically isolated post-tensioning tendons; proceedings of the Schriftenreihe der Technischen Universität Wien, Proc Third European Conference on Structural Control, F, 2004 [C].

[18] Hartz-Ing. U. Anwendung von ETAG 013: Spannverfahren für das Vorspannen von Tragwerken (Post-tensioning kits for prestressing of structures). Ein Erfahrungsbericht [J]. Dibt Mitteilungen, 2005, 36(6): 182–7.

[19] Elsener B. Monitoring of electrically isolated post-tensioning tendons [J]. Tailor made, 2008.