

一、成果名称：高端动力装备轴系动力润滑及故障诊断技术

二、完成单位：陕西铁路工程职业技术学院

三、完成人：黑棣 郑美茹 门闯社 左维琦 袁吉

四、成果简介：项目围绕高端动力装备轴系，开展了动力润滑及故障诊断方面的研究。研究成果主要有以下几方面：

1.高端动力装备支承轴承非线性油膜力的快速求解方法

根据高端动力装备支承轴承的不同结构形式，提出了求解支承轴承非线性油膜力的快速求解方法，有效克服了大规模数值计算带来的资源消耗，提高了计算速度。针对重型燃气轮机的固定瓦-可倾瓦组合支承轴承，根据润滑油膜的破裂条件，通过求解润滑控制方程，建立了组合支承轴承的单瓦油膜力数据库。针对固定瓦支承轴承，在运用分离变量法实现润滑控制方程等价变换的基础上，通过结合 Sturm-Liouville 理论和变分原理，提出了两种求解固定瓦支承轴承非线性油膜力的解析解方法。

2.高端动力装备组合支承轴承的热流体动力润滑

考虑固定瓦-可倾瓦组合支承轴承可倾瓦块的球形支点具有顺应性的特点，构建了组合支承轴承可倾瓦块球形支点的摩擦力描述模型，揭示了可倾瓦块支点摩擦对组合支承轴承润滑性能的影响机理。在考虑可倾瓦块与支点间的

摩擦力的基础上，提出了组合支承轴承润滑油膜温度场的求解算法和轴瓦弹性变形的流固耦合 3D 有限元方法，解决了目前重型燃气轮机组合支承轴承润滑分析时依赖于固定支点、绝热和刚性假设等的局限。

3.高端动力装备轴系的完整动力学模型及动力特性

针对针对高端动力装备（例如：燃气轮机）的周向拉杆转子，考虑拉杆转子轮盘之间的接触效应和陀螺效应，在分析拉杆转子势能和动能的基础上，依据拉格朗日动力学方程推导得到了周向拉杆转子的运动学方程。为了求解周向拉杆转子的动力学方程，提出了一种 Newmark 的改进算法，能够在对累积误差进行补偿的同时满足运动约束条件和动力平衡方程，以提高 Newmark 法的计算精度。为了分析非线性系统周期解稳定性和分岔行为，引入预估-校正机理，基于 Wilson- θ 法，并结合 Floquet 理论形成一种有效的求解方法。

4.轴系故障诊断

考虑转轴系统支座松动、碰摩、裂纹等故障，建立了具有故障的转子系统模型，运用非线性动力学理论，研究了转子系统在单一故障、多故障并存的情况下的运动规律，并研究了其演化规律，为转子故障诊断以及预防奠定了基础。

五、完成人合作关系情况

序号	合作方式	合作者及排名	合作时间	合作成果	证明材料
1	共同立项	黑棣/1, 郑美茹/2, 左维琦/4, 袁吉/5	2019 年 8 月	纵向立项	陕西省自然科学基金（2019JQ-928）-重型燃气轮机转子系统动力学研究
2	共同立项	黑棣/1, 郑美茹/2,	2019 年 8 月	纵向立项	渭南市科研计划项目（2016KYJ-1-2）-考虑温粘效应滑动轴承-转子系统动力学研究 渭南市科研计划项目（2022ZDYFJH-25）-表面织构动压滑动轴承-转子系统动力学研究
3	专利合著	黑棣/1, 门闯社/3	2023 年 1 月	发明专利	发明专利（2023101460213）-水轮机全负荷工况自适应控制方法
4	合作论文	黑棣/1, 郑美茹/2	2015 年 7 月	论文	论文（SCI）-Investigation on the dynamic behaviors of a rod fastening rotor based on an analytical solution of the oil film force of the supporting bearing 论文（北大核心）-基于精细积分法的轴承-拉杆转子系统非线性动力学分析 论文（北大核心）-具有基座松动和碰摩故障拉杆转子-轴承系统动力学分析
5	专利合著	黑棣/1, 郑美茹/2	2015 年 7 月	实用新型专利	实用新型专利（2019211305285）-一种具有耐振动性的机械轴承座 实用新型专利（2019211313351）-一种轴承夹紧装置

六、代表性论文专著目录

序号	论文专著名称	刊名	发表时间	年卷页码 (xx 年 xx 卷 xx 页)	作者	通讯作者(含 共同作者)	第一作者(含 共同作者)	国内 作者 (中文名)	他引 总次数	检索 数据库	参与人(成果完 成人)	知识产权 是否归 国内所有
1	Investigation on the dynamic behaviors of a rod fastening rotor based on an analytical solution of the oil film force of the supporting bearing	Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control	2020 年 5 月	2021, 40(2) 707-739	黑棣	黑棣	黑棣	黑棣, 郑美茹	6	SCI	黑棣, 郑美茹	是
2	基于分数阶次符号函数的永磁同步电机滑模控制技术	电工技术学报	2017 年 5 月	2017, 32(09):56-62	郑美茹	郑美茹	郑美茹	郑美茹, 王圣, 王丰, 刘文阳	77	EI	郑美茹	是
3	有限长轴承支撑的转子系统非线性动力学分析	中国机械工程	2015 年 10 月	2015, 26(19): 2633-2640	黑棣	黑棣	黑棣	黑棣, 吕延军, 张永芳	9	CSCD	黑棣	是
4	有限长滑动轴承非线性油膜力的一种近似解析解	机械强度	2016 年 8 月	2016,38(04):680-685	黑棣	黑棣	黑棣	黑棣, 路遵友	3	CSCD	黑棣	是
5	固定-可倾瓦轴承支撑的转子的非线性动力学特性	机械强度	2016 年 10 月	2016,38(05):940-946	黑棣	黑棣	黑棣	黑棣, 吕延军, 张永芳	5	CSCD	黑棣	是
6	基于精细积分法的轴承-拉杆转子系统	轴承	2017 年 4 月	2017,04:39-47	黑棣	黑棣	黑棣	黑棣, 郑美茹	1	北大核心	黑棣, 郑美茹	是

	非线性动力学分析											
7	具有基座松动和碰摩故障拉杆转子-轴承系统动力学分析	机电工程	2020 年 12 月	2020,37(12):1439-1446	郑美茹	郑美茹	郑美茹	郑美茹, 黑棣	2	北大核心	郑美茹, 黑棣	是

七、主要知识产权（标准、规范）目录

序号	知识产权类别	知识产权名称	国家（地区）	授权号（批准号）	授权日期	证书编号	权利人	发明人
1	发明专利	水轮机全负荷工况自适应控制方法	中国	CN 116047915B	2023 年 8 月 15 日	2023101460213	陕西铁路工程职业技术学院	门闯社, 毛晓姝, 姜留涛, 黑棣, 王海洋, 梁哲, 张楚翊, 郑彦泽
2	实用新型专利	一种具有耐振动性的机械轴承座	中国	CN 210769864U	2020 年 6 月 16 日	2019211305285	陕西铁路工程职业技术学院	黑棣, 郑美茹
3	实用新型专利	一种轴承夹紧装置	中国	CN 210650175U	2020 年 6 月 2 日	2019211313351	陕西铁路工程职业技术学院	郑美茹, 黑棣