



电气工程系列丛书

DESIGN RESEARCH OF
NEW TYPE AUXILIARY BEARING IN
ACTIVE MAGNETIC
BEARING SYSTEM

朱益利 著

主动磁悬浮轴承系统中
新型保护轴承的设计研究

 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS



电气工程系列丛书

本书由江苏高校品牌专业建设工程资助项目 (TAPP, 项目负责人: 朱锡芳, PPZY2015B129)、常州工学院 - “十三五”江苏省重点学科项目 - 电气工程重点建设学科、2016年度江苏省高校重点实验室建设项目 - 特种电机研究与应用重点建设实验室、国家自然科学基金项目 (51405040)、江苏省高校自然科学基金重大项目 (17KJA470001)、政策引导类计划 - 前瞻性联合研究项目 (BY2016031-03)、常州工学院“青年学者支持计划”项目资助出版

朱益利 著

主动磁悬浮轴承系统中 新型保护轴承的设计研究

 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

镇江

图书在版编目(CIP)数据

主动磁悬浮轴承系统中新型保护轴承的设计研究 /
朱益利著. — 镇江: 江苏大学出版社, 2017. 12
ISBN 978-7-5684-0683-3

I. ①主… II. ①朱… III. ①磁悬浮轴承—设计—研究 IV. ①TH133.33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 307712 号

主动磁悬浮轴承系统中新型保护轴承的设计研究

Zhudong Cixuanfu Zhoucheng Xitong Zhong Xinxing Baohu
Zhoucheng De Sheji Yanjiu

著 者/朱益利

责任编辑/郑晨晖

出版发行/江苏大学出版社

地 址/江苏省镇江市梦溪园巷 30 号(邮编: 212003)

电 话/0511-84446464(传真)

网 址/http://press. ujs. edu. cn

排 版/镇江华翔票证印务有限公司

印 刷/虎彩印艺股份有限公司

开 本/890 mm×1 240 mm 1/32

印 张/5.25

字 数/175 千字

版 次/2017 年 12 月第 1 版 2017 年 12 月第 1 次印刷

书 号/ISBN 978-7-5684-0683-3

定 价/32.00 元

如有印装质量问题请与本社营销部联系(电话:0511-84440882)

前 言

近 10 年国内外有关保护轴承研究的重点主要集中在动力学行为的描述、参数优化、热分析与转子跌落试验研究等方面。为了提高保护轴承承受振动冲击的能力,通常在径向集成一套弹性阻尼器,国内外都有一些相关理论和试验研究。

本书提出两种新型保护轴承:一种是双层滚珠轴承作保护轴承;另一种是自消除间隙保护轴承。采用双层滚珠轴承作为保护轴承,可将保护轴承的极限转速提高 20% ~ 30%,并吸收大部分由振动冲击产生的能量。本书重点研究了这种新型保护轴承的运动学、动力学和静力学基本问题,为磁悬浮轴承系统的发展和应用提供一种极限转速高、寿命长的新型保护轴承。自消除间隙保护轴承能在磁悬浮轴承失效后及时动作消除保护间隙,减少转子跌落所带来的冲击和破坏,让转子在保护轴承的支撑下自由降速,以提高磁悬浮轴承系统的可靠性。

本书可供从事磁悬浮轴承系统研究与应用的相关技术人员参考阅读。

符号说明

符号	说明	符号	说明
A_i, A_o	不受载荷时, 双层滚珠轴承的内、外层轴承的内、外环滚道曲率中心之间的距离	D_{pw}	滚动轴承节径
A_r	径向磁悬浮轴承磁极面积	D_w	滚珠直径
A	引入的系数矩阵	D_{ptr}	公差环上突起的节径
a	滚珠与滚道之间接触椭圆的长半轴长度	d	滚动轴承内径
B	滚动轴承厚度	d_{ij}, d_{lej}	双层滚珠轴承受冲击后, 内层左侧的第 j 个滚珠对应处的内、外环滚道曲率中心沿径向移动的距离
B_{tr}	公差环材料的厚度	E_b, E, E_{tr}	分别为轴承滚珠、套圈和公差环的材料弹性模量
B_1, B_2	引入的系数矩阵	E_1, E_2	两接触体的弹性模量
b	滚珠与滚道之间接触椭圆的短半轴长度	E_{bl}, E_{l2}, E_s	位移变换矩阵
C_{ed}	安装在保护轴承系统中的弹性阻尼器支撑阻尼	e	滚珠与套圈间接触椭圆的偏心率
C_{ib}	内层轴承的径向支撑阻尼	e_r	转子的不平衡度
C_{ob}	外层轴承的径向支撑阻尼	F	相对应两边电磁铁的合力
C_{edb}	弹性阻尼器支撑下的双层滚珠轴承系统的支撑阻尼矩阵	F_-, F_+	正、负两边电磁铁产生的电磁力
c_{su}	某自由度磁悬浮轴承的支撑阻尼	F_a, F_r	轴承所受到的轴向、径向载荷
c_{r1}, c_{r2}	一、二级保护轴承的单边保护间隙	F_{a0}	配对角接触球轴承的轴向预紧力
D	滚动轴承外径	F_{a1x}, F_{a1y}	左端径向磁悬浮轴承沿 x, y 轴方向的支撑力
D_{iw}, D_{ow}	双层轴承的内、外层滚珠直径	F_{a2x}, F_{a2y}	右端径向磁悬浮轴承沿 x, y 轴方向的支撑力
D_{ipw}, D_{opw}	双层轴承的内、外层轴承节径	F_{b11x}, F_{b11y}	左端一级保护轴承沿 x, y 轴方向的支撑力

符号	说明	符号	说明
F_{b12x}, F_{b12y}	右端一级保护轴承沿 x, y 轴方向的支撑力	F_{oix}, F_{oiy}	中圈受到外层轴承滚珠沿 x, y 轴方向的弹性支撑力
F_{b21x}, F_{b21y}	左端二级保护轴承沿 x, y 轴方向的支撑力	F_t	保护轴承作用于转子上的摩擦力
F_{b22x}, F_{b22y}	右端二级保护轴承沿 x, y 轴方向的支撑力	F_{trx}, F_{try}	公差环作用于轴承座上的沿 x, y 轴方向的弹性力
F_{bx}, F_{by}	转子作用于内圈的沿 x 轴和 y 轴方向的力向量	F_a	磁悬浮轴承电磁力向量
F_{cb}	轴承滚珠的离心力	F_{b1}, F_{b2}	一、二级保护轴承的支撑反力向量
F_{cx}, F_{cy}	转子沿 x, y 轴方向的离心力	F_c	转子离心力向量
F_{edx}, F_{edy}	轴承座受到弹性阻尼器的沿 x, y 轴方向的弹性支撑力	F_{edb}	弹性阻尼器支撑下的双层滚珠轴承中的滚珠作用于套圈的力向量
F_{hx}, F_{hy}	轴承座受到机座的沿 x, y 轴方向的碰撞力	F_{edd}	弹性阻尼器作用于轴承座上的弹性力向量
F_{ilej}, F_{i2ej}	双层滚珠轴承中, 内层左、右侧第 j 个滚珠的离心力	F_{edh}	轴承座受到机座的碰撞力向量
F_{iej}	双层滚珠轴承中, 内层第 j 个滚珠的离心力	F_{edrb}	转子作用在弹性阻尼器支撑下双层保护轴承内圈的力向量
F_{iex}, F_{iey}	双层轴承中圈受到内层轴承滚珠沿 x, y 轴方向的弹性支撑力	F_g	转子自身重力向量
F_{iix}, F_{iiy}	双层轴承内圈受到内层轴承滚珠沿 x, y 轴方向的弹性支撑力	f	轴承滚道曲率半径系数
F_n	保护轴承作用于转子上的法向力	f_1	与轴承类型和载荷相关的系数
F_{nh}	轴承座与机座之间的法向碰撞力	f_{ii}, f_{ie}	双层轴承的内层轴承内、外环滚道的沟曲率半径系数
F_{nms}, F_{nmd}	转子跌落到单、双层滚珠轴承上的最大法向碰撞力	f_o	与轴承类型和润滑方式相关的系数
$F_{oc\iota}$	双层轴承中, 外层第 ι 个滚珠的离心力	f_{oi}, f_{oe}	双层轴承的外层轴承内、外环滚道的沟曲率半径系数
		G_a	轴承的轴向游隙
		G_{am}	功率放大器的增益

符号	说明	符号	说明
G_c	控制器的传递函数	K_{ilij}, K_{ilej}	双层滚珠轴承的内层左侧第 j 个滚珠与相应内、外滚道间的接触刚度
G_{ia}, G_{oa}	双层滚珠轴承内、外层轴承的轴向游隙	K_{ilnj}	双层滚珠轴承的内层左侧第 j 个滚珠与其接触的相应滚道间的总接触刚度
G_{ir}, G_{or}	双层滚珠轴承内、外层轴承的径向游隙	K_{oia}, K_{oia}	双层滚珠轴承的外层轴承中, 第 i 个滚珠与内、外滚道间接触刚度
G_r	轴承的径向游隙	K_p	比例系数
G_s	位移传感器的增益	K_{ir}	公差环上单个突起的支撑刚度
G	转子陀螺力矩矩阵	$K(e)$	第一类完全椭圆积分
g	重力加速度	k	滚珠与套圈间接触椭圆的椭圆率
g_x, g_y	沿 x, y 轴方向的重力加速度分量	k_i	磁悬浮轴承电流刚度系数
i_0	通过磁悬浮轴承定子线圈的偏置电流	k_{sa}	某自由度磁悬浮轴承的支撑刚度
i_c	通过磁悬浮轴承定子线圈的控制电流	k_x	磁悬浮轴承位移刚度系数
J	转子绕 x, y 轴的转动惯量	L_1, L_2	径向载荷作用点到左、右端支撑轴承间的距离
J_{iz}, J_{oz}	内圈和中圈绕 z 轴的转动惯量	L_b	转子与内圈之间的接触长度
J_z	转子绕 z 轴的转动惯量	$L(e)$	第二类完全椭圆积分
j	内层轴承的第 j 个滚珠	l_{a1}, l_{a2}	左、右端径向磁悬浮轴承距转子质心的距离
K	滚珠与套圈之间的接触刚度	l_{b11}, l_{b12}	左、右端一级保护轴承距转子质心的距离
K_c	转子与内圈之间的接触刚度	l_{b21}, l_{b22}	左、右端二级保护轴承距转子质心的距离
K_{ch}	轴承座与机座之间的接触刚度	l_{s1}, l_{s2}	左、右端径向位移传感器距转子质心的距离
K_d	微分系数	M_g	滚珠旋转时产生的陀螺力矩
K_{cd}	弹性阻尼器的支撑刚度		
K_i	积分系数		

符号	说明	符号	说明
M_{ij}, M_{ogr}	双层滚珠轴承中内层第 j 个滚珠、外层第 l 滚珠旋转时所产生的陀螺力矩	O_{ilbj}, O'_{ilbj}	配对预紧安装前后左侧角接触球轴承的第 j 个滚珠中心位置
m_a, m_b	与滚珠和滚道之间的接触椭圆偏心率有关的系数	O_{ilej}, O'_{ilej}	配对预紧安装前后左侧角接触球轴承的第 j 个滚珠对应处的外滚道曲率中心位置
m_h	保护轴承外圈与轴承座的质量和	$O''_{ilbj}, O'_{ilbj}, O''_{ilej}, O'_{ilej}$	保护轴承受冲击后,左侧角接触轴承第 j 个滚珠中心、第 j 个滚珠对应处的内滚道沟曲率中心和外滚道沟曲率中心位置
m_i	内圈的质量	O_{i2bj}, O'_{i2bj}	配对预紧安装前、后右侧角接触轴承的第 j 个滚珠中心位置
m_o	中圈的质量	O_{i2ej}, O'_{i2ej}	配对预紧安装前、后右侧角接触轴承的第 j 个滚珠对应处的外滚道曲率中心位置
m_r	转子的质量	$O''_{i2bj}, O'_{i2bj}, O''_{i2ej}, O'_{i2ej}$	保护轴承受冲击后,左侧角接触轴承第 j 个滚珠中心、第 j 个滚珠对应处的内滚道沟曲率中心和外滚道沟曲率中心位置
m	转子质量矩阵	O'_{ibj}, O_{ibj}	双层滚珠轴承受载前、后内层第 j 个滚珠的中心位置
m_{edh}	弹性阻尼器支撑下双层滚珠轴承的质量矩阵	O_{iej}, O'_{iej}	双层滚珠轴承受载前、后内层第 j 个滚珠对应处的外环滚道曲率中心位置
N	径向磁悬浮轴承励磁线圈的匝数	O_{ij}, O'_{ij}	双层滚珠轴承受载前、后内层第 j 个滚珠对应处的内环滚道曲率中心位置
N_b	滚动轴承的滚珠个数	O_{oel}	双层滚珠轴承受载前、后外层第 l 个滚珠对应处的外滚道沟曲率中心初始位置
N_{ib}	单个内层轴承的滚珠个数	O_{oil}, O'_{oil}	双层滚珠轴承受载前、后外层第 l 个滚珠对应处的内滚道沟曲率中心位置
N_{ob}	外层轴承的滚珠个数	O_{obl}, O'_{obl}	轴承受载前、后外层第 l 个滚珠的中心位置
N_{tr}	公差环突起的个数	O_r	转子的质心位置
n_b	轴承的工作转速		
n_i, n_o	轴承内、中圈的转速		
n_{r0}	转子开始跌落时转速		
O_{oel}, O'_{oel}	轴承受载前、后外层第 l 个滚珠对应处的外环滚道曲率中心位置		
O_{oil}, O'_{oil}	轴承受载前、后外层第 l 个滚珠对应处的内环滚道曲率中心位置		
O_{obl}, O'_{obl}	轴承受载前、后外层第 l 个滚珠的中心位置		

符号	说明	符号	说明
P_m	滚珠与滚道之间最大接触应力	r_{oi}, r_{oe}	双层轴承的外层轴承的内、外环滚道沟曲率半径
P_1	轴承内部摩擦力矩计算载荷	T_d	滚动轴承的摩擦力矩
Q	滚珠与滚道之间的接触力	T_{di}	单个内层轴承的内部摩擦力矩
Q_e	滚珠与外环滚道之间的接触力	T_{do}	外层轴承的内部摩擦力矩
Q_i	滚珠与内环滚道之间的接触力	T_L	与载荷相关的轴承摩擦力矩
Q_{ij}, Q_{iej}	双层滚珠轴承的内层轴承中,第 j 个滚珠与内、外环间的接触力	T_v	与转速以及润滑等参数相关的轴承摩擦力矩
Q_{ilj}, Q_{ilej}	双层轴承中,内层左侧第 j 个滚珠与内、外环滚道间的接触力	u	滚珠的弹性变形量
Q_{i2j}, Q_{ie2j}	双层轴承中,内层右侧第 j 个滚珠与内、外环滚道间的接触力	u_a	轴承的轴向位移
Q_{\max}	滚珠与滚道之间的最大接触力	u_{at}	轴承的轴向弹性变形
$Q_{oi\iota}, Q_{oe\iota}$	双层轴承的外层第 ι 个滚珠与内、外环滚道间的接触力	u_b	转子与内圈之间的相对位移
R_b	保护轴承内圈的内孔半径	u_i	内圈与中圈的相对位移
R_r	保护轴承对应处转子的轴半径	u_{ia}, u_{ir}	双层滚珠轴承的内层轴承轴、径向位移
R_{r11}, R_{r12}	转子在左端和右端一级保护轴承位置对应处的轴半径	u_{ij}, u_{iej}	双层滚珠轴承的内层第 j 个滚珠与相应内、外环之间的接触变形
R_{r21}, R_{r22}	转子在左端和右端二级保护轴承位置对应处的轴半径	u_{ilj}, u_{ilej}	双层轴承的内层轴承中,左侧第 j 个滚珠与其相接触的内、外环滚道间接触变形
r	轴承的滚道沟曲率半径	u_{ilnj}	双层轴承的内层轴承预紧安装后,左侧第 j 个滚珠与内、外滚道之间接触的总弹性变形量
r_{ii}, r_{ie}	双层轴承的内层轴承的内、外环滚道沟曲率半径	u_o	中圈与外圈的相对位移
		u_{on}, u_{or}	双层滚珠轴承的外层轴承的轴向和径向位移
		$u_{oi\iota}, u_{oe\iota}$	双层轴承的外层轴承第 ι 个滚珠与内、外滚道之间的接触变形

符号	说明	符号	说明
u_r	轴承的径向位移	X_{o2l}, Y_{o2l}	双层滚珠轴承受载后,外层轴承的第 l 个滚珠对应处的内、外环曲率中心间距离的轴向和径向投影
u_{rl}	轴承的径向弹性变形	x_b	转子在保护轴承位置对应处沿 x 轴方向位移
v, v_b	套圈和滚珠的材料泊松比	x_h	轴承座沿 x 轴方向振动位移
v_c	磁悬浮轴承控制器的输入信号	x_i, x_o	内、中圈沿 x 轴方向振动位移
ν_o	润滑剂在工作温度下的运动黏度	x_r	转子质心沿 x 轴方向位移
ν_s	位移传感器的输出信号	x_{s1}, x_{s2}	转子在左、右端径向位移传感器位置对应处的沿 x 轴方向的位移
ν_1, ν_2	两接触体的材料泊松比	x_0	某径向自由度上转子与磁悬浮轴承定子间的初始气隙
w_{tr}	公差环上突起的宽度	\mathbf{x}	转子质心的位移向量
X_{ilij}, Y_{ilij}	双层轴承受冲击后,内层左侧的第 j 个滚珠对应处的外环滚道曲率中心与滚珠中心之间距离的轴向和径向投影	\mathbf{x}_{edh}	弹性阻尼器支撑下的双层滚珠轴承的振动位移向量
X'_{ilij}, Y'_{ilij}	双层轴承受冲击后,内层左侧的第 j 个滚珠对应处的内、外环滚道曲率中心之间距离的轴向和径向投影	\mathbf{x}_s	径向传感器对应位置处转子的位移向量
X_{ij}, Y_{ij}	双层滚珠轴承受载后,内层轴承的第 j 个滚珠对应处的外环曲率中心与滚珠中心之间距离的轴向和径向投影	y_b	转子在保护轴承位置对应处沿 y 轴方向位移
X_{2j}, Y_{2j}	双层滚珠轴承受载后,内层轴承的第 j 个滚珠对应处的内、外环曲率中心间距离的轴向和径向投影	y_h	轴承座沿 y 轴方向的振动位移
$X_{ol\epsilon}, Y_{ol\epsilon}$	双层滚珠轴承受载后,外层轴承的第 ϵ 个滚珠对应处的外环曲率中心与滚珠中心之间距离的轴向和径向投影	y_i, y_o	内、中圈沿 y 轴方向振动位移
		y_r	转子质心沿 y 轴方向位移
		y_{s1}, y_{s2}	转子在左、右端径向位移传感器位置对应处的沿 y 轴方向的位移
		α	滚珠接触角
		$\alpha_i, \alpha_{\epsilon}$	滚珠与内、外滚道之间的接触角
		$\alpha_{ij}, \alpha_{ij\epsilon}$	双层滚珠轴承的内层第 j 个滚珠与内、外环滚道间的接触角

符号	说明	符号	说明
$\alpha_{ij}, \alpha_{iej}$	双层轴承受冲击后,内层配对安装的角接触球轴承中,左侧第 j 个滚珠与内、外环滚道间的接触角	$\lambda_{ilj}, \lambda_{ilej}$	双层轴承中,内层左侧内、外滚道控制修正系数
α_{i0}, α_{o0}	双层滚珠轴承的内、外层滚珠初始接触角	$\lambda_{i2j}, \lambda_{i2ej}$	双层轴承中,内层右侧内、外滚道控制修正系数
α'_{i0}	双层轴承中,内层配对角接触球轴承预紧安装后滚珠接触角	μ_d	滑动摩擦因数
$\alpha_{oit}, \alpha_{oet}$	双层滚珠轴承的外层第 t 个滚珠与内、外环间的接触角	μ_s	最大静摩擦因数
α_0	滚珠初始接触角	μ_0	真空磁导率
β	滚珠的姿态角	ξ	公差环上第 ξ 个突起
γ, γ'	引入的中间参数	ρ_b	滚珠的材料密度
δ_b	转子与内圈之间的碰撞接触深度	$\sigma_{\text{tr}\xi}$	公差环上第 ξ 个突起的变形
δ_h	轴承座与基座间的碰撞接触深度	σ_0	公差环上各个突起的预变形
δ^*	引入的无量纲系数	τ_d	滤波时间常数
$\dot{\theta}_b$	轴承的工作转速	φ_{ij}	双层轴承的内层第 j 个滚珠位置角
θ_i, θ_o	内、中圈绕 z 轴转动的角位移	φ_{ot}	双层轴承的外层第 t 个滚珠位置角
θ_r	转子绕 z 轴旋转的角位移	χ_{dsF}	双层轴承撑下,转子跌落后最大碰撞力相对于单层轴承的减小比率
θ_x, θ_y	转子绕 x, y 轴转动的角位移	ϕ_h	轴承座相对于基座的径向振动方向与 x 轴方向之间的夹角
ι	双层轴承中外层的第 ι 个滚珠	ϕ_i	内圈与中圈的相对振动方向与 x 轴方向之间的夹角
κ	取决于两碰撞体材料的系数	ϕ_o	中圈与外圈的相对振动方向与 x 轴方向之间的夹角
λ	引入的轴承滚道控制修正系数	ω	转子转动角速度
λ_i, λ_o	轴承内、外滚道控制修正系数	ω_b	滚珠的自转角速度
		ω_m	滚珠的公转角速度
		Δx	转子在电磁铁位置处的振动位移
		Δx_s	位移传感器位置对应处检测到的转子振动位移

缩 略 词

英文	中文
AMBs(Active Magnetic Bearing System)	主动磁悬浮轴承系统
CB(Catcher Bearing)	保护轴承
DDBB(Double-decker Ball Bearing)	双层滚珠轴承
DSP(Digital Signal Processor)	数字信号处理器
IPM(Intelligent Power Modules)	新型主动功率模块
MATLAB(Matrix Laboratory)	工程计算软件
PID(Proportion Integral Derivative)	比例积分微分
SDBB(Single-decker Ball Bearing)	单层滚珠轴承

目 录

第 1 章 绪论 001

- 1.1 主动磁悬浮轴承系统简介 001
- 1.2 保护轴承研究的必要性 002
- 1.3 国内外研究现状 005
 - 1.3.1 传统保护轴承的研究现状 005
 - 1.3.2 新型保护轴承的研究现状 008
- 1.4 主要研究内容 012

第 2 章 双层滚珠轴承的力学特性研究 015

- 2.1 双层滚珠轴承介绍 015
- 2.2 滚动轴承力学特性的分析方法 017
- 2.3 双层滚珠轴承数学模型的建立 018
 - 2.3.1 双层角接触球轴承数学模型 018
 - 2.3.2 双层深沟球轴承数学模型 028
- 2.4 计算结果及讨论 029
 - 2.4.1 数学模型及计算程序的验证 029
 - 2.4.2 双层角接触球轴承力学特性分析的计算结果 030
 - 2.4.3 双层深沟球轴承力学特性分析的计算结果 044
- 2.5 试验验证 047
- 2.6 本章小结 051

第3章 转子跌落到弹性阻尼器支撑下的双层滚珠轴承上的动力学模型 053

- 3.1 转子跌落试验台的基本结构 053
 - 3.1.1 转子跌落试验台结构 053
 - 3.1.2 弹性阻尼器支撑下的双层滚珠轴承结构 054
- 3.2 刚性转子动力学模型 055
 - 3.2.1 磁悬浮轴承失效前 056
 - 3.2.2 磁悬浮轴承失效后 058
- 3.3 柔性转子动力学模型 060
- 3.4 磁悬浮轴承支撑模型 064
- 3.5 用作保护轴承的弹性阻尼器支撑下的双层滚珠轴承动力学模型 069
- 3.6 用作保护轴承的弹性阻尼器支撑下双层滚珠轴承支撑弹性力模型 073
 - 3.6.1 内层为角接触球轴承 073
 - 3.6.2 内层为深沟球轴承 079
- 3.7 转子跌落后动力学响应的仿真计算流程 081
- 3.8 本章小结 083

第4章 转子跌落后的动力学响应研究 084

- 4.1 无弹性阻尼器支撑 084
 - 4.1.1 转子跌落到单、双层滚珠轴承上的动力学响应对比 086
 - 4.1.2 转子偏心距的影响 096
 - 4.1.3 轴向预紧力的影响 098
 - 4.1.4 滚珠接触角的影响 100
 - 4.1.5 径向游隙的影响 102
 - 4.1.6 摩擦系数的影响 104
 - 4.1.7 保护间隙的影响 107
 - 4.1.8 轴承型号的影响 109

4.1.9	转接环材料的影响	112
4.1.10	保护轴承支撑阻尼的影响	113
4.2	有弹性阻尼器支撑	114
4.2.1	公差环作为弹性阻尼器的应用研究	115
4.2.2	金属橡胶环作为弹性阻尼器的应用研究	120
4.3	破坏性试验研究	124
4.4	本章小结	127
第5章	自消除间隙保护轴承的研究与应用	129
5.1	自消除间隙保护轴承的结构设计	129
5.2	自消除间隙保护轴承的动力学研究	131
5.3	转子跌落后发热研究	138
5.4	本章小结	140
参考文献		141

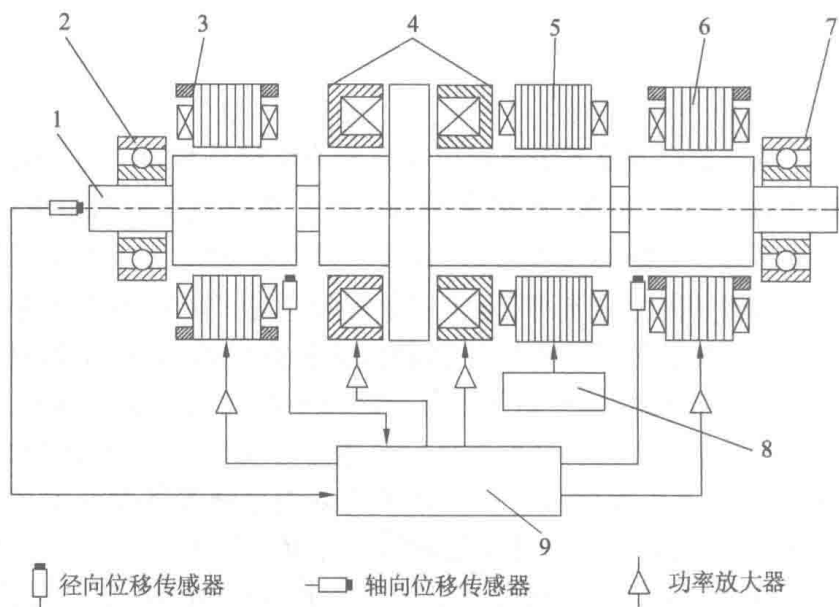
第 1 章 绪 论

主动磁悬浮轴承系统通过可控电磁力将转子悬浮于定子磁极中间,因此具有无摩擦、无需润滑等优点。在磁悬浮轴承系统中,为了提高整个系统的可靠性,还需要一套保护轴承作为磁悬浮轴承失效后转子的临时支撑,保护磁悬浮轴承定子和电机定子不受损坏。传统保护轴承往往由于其较低的极限转速,无法支撑超高速转子旋转,且难以承受转子跌落后所带来的巨大振动与冲击,而造成保护轴承的失效。在国内外针对磁悬浮轴承系统的研究和应用过程中,已多次发生由于保护轴承失效而导致设备损坏的严重事故,因此如何提高磁悬浮系统中保护轴承的可靠性已成为目前国内外研究的热点。本章详细介绍国内外保护轴承的研究现状,并对全书的研究内容进行简要的介绍。

1.1 主动磁悬浮轴承系统简介

图 1-1 给出了主动磁悬浮轴承系统的主要组成部分。从图中可以看出,整个系统主要由电磁铁、位移传感器、功率放大器、控制器、转子、电机定子、变频器及保护轴承等组成。主动磁悬浮轴承利用可控电磁力将转子悬浮在定子中间,位移传感器检测到的转子位移,与位移参考值做比较后,通过控制器转变为控制信号,然后经过功率放大器将其转化为通过电磁铁的控制电流,进而控制电磁铁所产生的电磁力来维持转子的稳定悬浮。主动磁悬浮轴承由于实现了无机械接触和电子控制,与普通轴承相比具有无接触、无润滑、无磨损、可支撑超高速转子及轴承支撑特性可调等优点。

基于上述的一系列优越性,主动磁悬浮轴承在工业中拥有着广泛的应用前景。目前,主动磁悬浮轴承已作为一种先进的机电一体化产品,在工业领域得到了一定的应用^[1-6],如陀螺仪、高速电机、无轴承电机、航空发动机和人工心脏泵等。



1—转子;2—保护轴承;3—径向磁悬浮轴承定子;4—轴向磁悬浮轴承定子;
 5—电机定子;6—径向磁悬浮轴承定子;7—保护轴承;8—变频器;
 9—磁悬浮轴承控制器

图 1-1 主动磁悬浮轴承系统原理框图

1.2 保护轴承研究的必要性

随着主动磁悬浮轴承的应用范围逐步扩大,其可靠性作为工业产品重点考察的指标变得越来越重要。主动磁悬浮轴承的故障主要来源于电控系统,电控系统的故障主要包括控制器故障、传感器故障、功率放大器和执行器故障等。任何一种故障都会影响到主动磁悬浮轴承的悬浮性能,甚至导致整个系统的完全失效,一旦磁悬浮轴承突然失效,高速旋转的转子将跌落到装在系统两端的