

# 机电耦联动力学的研究进展

邱家俊

天津大学力学与工程测试系, 天津 300072

**摘要** 简要介绍了机电系统及机电耦联动力学包含的主要领域, 介绍了机电耦合非线性动力学研究中需要解决的两个基本问题, 对以电机为核心组成的机电耦联系统中的非线性振动及非线性动力学 3 个方面的研究成果进行了系统的阐述, 最后, 对今后研究的方向进行了展望。

**关键词** 机电耦联, 参差共振, 多重共振, 失稳振荡

## 1 机电耦联系统

机电耦合动力系统在国民经济的发展中占有重要的地位, 涉及到广泛的工农业生产和科学技术领域。

各种电机占社会总动力能源的 95% 以上, 60 万 kW 大型汽轮发电机组在国内已投产运行, 140 万 kW 汽轮发电机组在国外已投产运行, 我国正决定研制世界上最大的 70 万 kW 的大型水轮发电机组。由发电机联成的电力系统, 被应用于驱动种类繁多的电动机, 由分瓦功率的电钟指针, 直至几万 kW 的轧钢电机。在控制系统中用作功率放大的直流电机, 有功率可达 2 万 kW 的交磁电机放大机, 此外还有船舶及矿山用发电机组等。

交通工具的发展, 推动了高能电动车、电气机车及高速磁浮列车的研制发展。磁浮列车利用强大的电磁力悬浮车体载重, 利用直线电机驱动列车前进, 配置一套控制磁浮力、拖动力及气隙大小等项目的控制系统, 形成一个机电耦联动力系统。

用电场或磁场来悬浮陀螺仪转子、悬吊加速运动部件以实现各种运送机械和各类机械传动, 特别是高速磁浮轴承的研究、应用, 有了良好发展的前景。磁炮、磁力发射装置正在研制。

自动化控制系统中用途各异的机电控制元件及各种机电仪表。

这些机电装置都是进行机电能量转换的, 它们的发展促进了机电动力学学科的形成和发展。同样, 机电动力学的研究也推动着各种机电系统向前发展。

## 2 机电耦联动力学

机电动力学是将力学与电磁学结合起来, 研究运动物体在电磁场中发生相互作用的规律。它们包含着电机动力学、磁弹性动力学、磁流体动力学、等离子体动力学、生物系统机电学等广泛的学科领域。

收稿日期: 1997-05-04, 修回日期: 1997-12-22

机电耦联系统的动力学问题是比较复杂的,它涉及到多个学科的基础理论,包括力学(指一般力学、连续介质力学、振动理论)与电学(指电磁场理论、电路理论、电机理论)及其形成的交叉学科。

机电之间相互作用规律的研究,需要解决两个方面的问题。一方面是正确地建立机电系统相耦联的数学模型。机电装置是进行机电能量转换的。机电分析动力学<sup>[1]</sup>是研究机电耦联问题很有效的工具,它从能量的观点出发,作为统一的方法,可用于建立一般力学与电路理论、连续介质力学与电磁场理论相耦合的微分方程组系统,去研究机电耦联的相互作用规律,这方面的工作可参阅文献[2~13],其中有我们已取得的较系统的科研成果。另一方面的问题是所有机电耦联系统描述的数学方程都是非线性的,所以非线性方程组的定量定性方法的研究进展,是机电耦联问题的研究者们特别关注的问题。在弱非线性情况下,已有较为有效的成熟方法。一般采用的方法有Poincare的小参数法<sup>[14,15]</sup>,KBM渐近法<sup>[16]</sup>,该法对单自由度和多自由度系统的求解都是十分有效的,并且大大简化了研究周期解的稳定性。Nayfeh和Mook将各种形式的多尺度法系统化,并有效的解决了一些连续介质系统的非线性振动问题<sup>[17]</sup>。强非线性振动以及非线性动力学问题是目前正在研究的课题。这方面的文献可参看[18~36]。

### 3 电机的机电动力学研究

以下集中介绍以电机为核心组成的机电耦联系统的非线性振动及非线性动力学问题。

#### 3.1 交流电机转子由电磁力激发的参数振动

电机的振动与噪声在国际上一直是电机界的重要课题。由电磁力激发的振动与噪声是研究的重点,电磁谐波力及其引起的振动有大量的文献资料,但主要成果局限于线性振动与噪声的研究领域。文献[37~48]从理论与实验中发现了各种非线性电磁力,进而把非线性振动与电机理论有机结合起来,开辟出新的研究领域。

由电磁力激发的对电机转子的参数共振,其所建数学模型的特点是:振动的周期系数非线性微分方程组与电机稳态电路的代数方程组构成统一的数学系统。由于振动微分方程组的系数是随运行的工况变化的,故它又属于慢变系数微分方程问题。例如,在三相对称情况下,电机转子在气隙磁场中所受的径向电磁力为

$$\left. \begin{aligned} F_x &= \lambda_1 x + \frac{3}{4} \lambda_1 (x^2 + y^2) x + \frac{1}{2} (\lambda_2 \cos 2\omega t + \lambda_3 \sin 2\omega t) x + \frac{1}{2} (\lambda_2 \sin^2 \omega t - \\ &\quad \lambda_3 \cos 2\omega t) y + \frac{1}{2} (\lambda_2 \cos 2\omega t + \lambda_3 \sin 2\omega t) x^3 - \frac{1}{2} (\lambda_2 \sin^2 \omega t - \lambda_3 \cos^2 \omega t) y^3 + \\ &\quad \frac{3}{4} (\lambda_2 \sin 2\omega t - \lambda_3 \cos 2\omega t) (x^2 y + y^3) \\ F_y &= \lambda_1 y + \frac{3}{4} \lambda_1 (x^2 + y^2) y + \frac{1}{2} (\lambda_2 \sin 2\omega t - \lambda_3 \cos 2\omega t) x - \frac{1}{2} (\lambda_2 \cos 2\omega t + \\ &\quad \lambda_3 \sin 2\omega t) y - \frac{1}{2} (\lambda_2 \sin 2\omega t - \lambda_3 \cos 2\omega t) x^3 - \frac{1}{2} (\lambda_2 \cos 2\omega t + \lambda_3 \sin 2\omega t) y^3 + \\ &\quad \frac{3}{4} (\lambda_2 \sin 2\omega t - \lambda_3 \cos 2\omega t) (x^3 + xy^2) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

力  $F_x, F_y$  是振动位移  $x, y$  的非线性函数,并带有时间  $t$  的周期函数。式(1)中的系数  $\lambda_1, \lambda_2$  及

$\lambda_3$  为

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= \frac{\pi R L A_0 k}{2\sigma} [F_{sm}^2 + F_{jm}^2 - 2F_{sm}F_{jm} \sin(\theta + \varphi)] \\ \lambda_2 &= \frac{\pi R L A_0 k}{2\sigma} [F_{sm}^2 - F_{jm}^2 \cos(2\theta + 2\varphi) - 2F_{jm}F_{sm} \sin(\theta + \varphi)] \\ \lambda_3 &= \frac{\pi R L A_0 k}{2\sigma} [F_{jm}^2 \sin(2\theta + 2\varphi) - 2F_{jm}F_{sm} \cos(\theta + \varphi)] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$\lambda_1, \lambda_2$  及  $\lambda_3$  中的  $F_{sm}$  是定子磁势, 其大小随定子电流  $I_s$  而定.  $F_{jm}$  是转子励磁磁势, 由励磁电流  $I_j$  而定.  $\theta$  是有功功率角, 反映电机功率的大小.  $\varphi$  是功率因数角, 反映电机的无功功率的情况. 定子磁势与功率因数角的关系见图 1, 图 2. 对于同步发电机在三相对称情况下的变量  $I_s, I_j, \theta, \varphi$  所满足的关系, 可由下面的非线性代数方程组描述

$$\begin{cases} E_0 \cos \theta = U + I_s x_t \sin \theta \\ E_0 \sin \theta = I_s x_t \cos \theta \\ E_0 = f(I_j) \\ P_{DE} = \frac{mU E_c}{x_t} \sin \theta \end{cases}$$

式中  $P_{DE}$  是由机械产生的功率, 例如汽轮机、水轮机等,  $E_0$  是由励磁调节系统控制的变量.

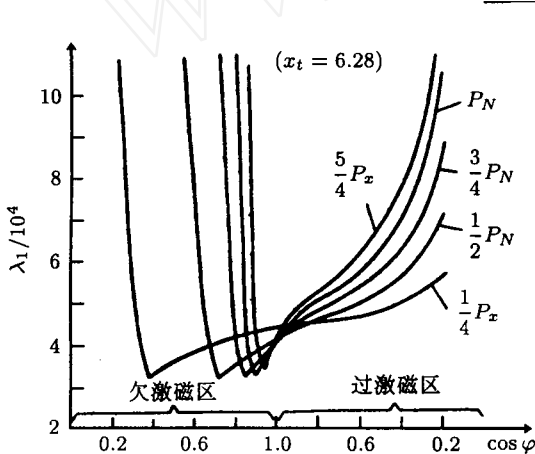


图 1  $\lambda_1$  与功率因数角的关系

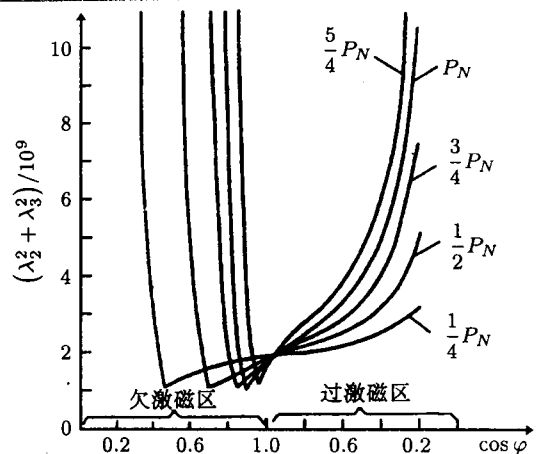


图 2  $\lambda_2, \lambda_3$  与功率因数角的关系

对于不同类型的电机 (例如同步发电机、异步电动机、直流电机等) 及不同的运行工况 (例如同三相、三相不对称及各种电机故障短路等), 则电机气隙磁场不同, 其磁场能量函数不同, 因之振动方程和电压方程也不相同, 其振动的规律因之不同.

文 [37] 研究了三相对称与三相不对称运行时, 电机转子由电磁力激发的参数共振, 得到了转子振动与拖动的相关特性和有明显几何特性的稳定性判据. 得到了高速电动机参数共振与强迫共振相耦合的振动规律, 由于参、强联合, 使纯参数共振的 2 条共振分支曲线分裂为 4, 而连接成 3 条共振分支曲线 (如图 3 所示). 文 [38] 研究了电磁参数对固有频率及共振特性的影响. 文 [39] 得到了一般交流电动机振动特性的过渡过程及起振过程的规律. 文 [40] 研究了多极低速电动机的参数共振规律. 以上各文的理论研究结果, 均得到了实验研究的验证. 所得到的共振规律的多样性是机械系统中所没有的. 例如, 共振区的宽度是变化的, 它随电压、电流大小而变化, 共振区的宽度不但会变, 而且共振区还会平移, 幅频特性形状随电磁参数改变而变化 (如

图 4 所示). 由于电机的负载及运行工况是经常改变的, 致使幅频特性经常发生变化. 随着电机运行工况及电磁参数的变化, 其振幅大小、共振区宽度及临界转速可能发生突然的或显著的变化.

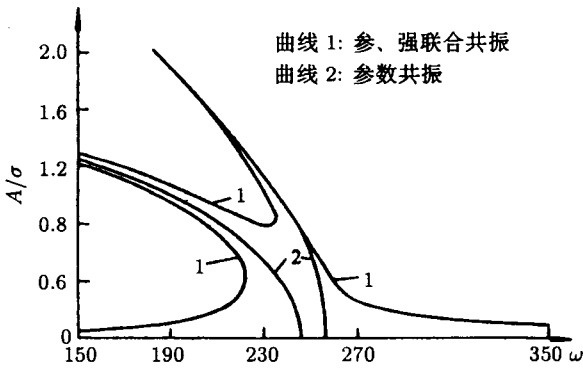


图 3

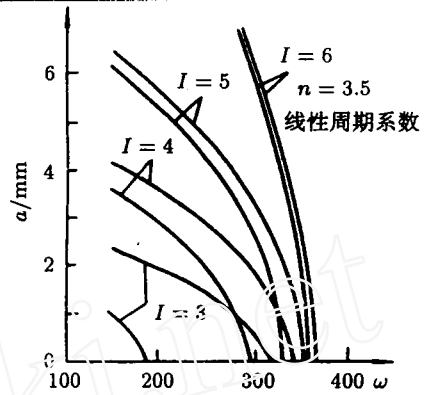


图 4 4 种不同电磁状态的参数共振曲线

汽轮发电机、水轮发电机向超大型发展, 其振动总是成为重要问题之一, 转子轴系是发电机组的核心部件. 转子的电磁激振动和机电耦联动力学问题是发电机特有的问题. 文 [41] 研究了同步发电机转子的参数共振、运动稳定性及减振问题, 文 [43] 研究了同步发电机转子与定子相耦合的参数共振, 得到的幅频特性随电机的有功功率和无功功率变化而发生多种形态的变化, 电磁非线性可使幅频特性由牛角状张开而变成喇叭状. 发电机组轴系的扭振研究近 20 多年来得到了发展. 文 [44] 研究了发电机组轴系的扭振参数共振, 得到了扭振的参、强联合共振. 文 [45] 研究了磁饱和状态下转子轴系的横、扭联合振动. 文 [46] 得到了发电机空载稳态不对称运行的扭振参数共振. 三相电压不对称对共振曲线有重要的影响, 不对称度越大, 共振区越大, 并使共振区向左移动得愈显著, 例如一相突然故障断路, 会使临界转速大幅度降低, 使共振区大大加宽, 它的一个后果是很容易使工作转速落入共振区内, 从而突然激发起大振幅的参数共振, 使转子碰磨定子.

### 3.2 交流电机转子电磁激发的多重共振

在非线性振动系统中, 除了在线性系统中固有频率  $k$  和外干扰力频率  $\omega$  相等时产生的共振之外, 还会发生以下各种共振:

- (1)  $k \approx \omega/n$ , 亚谐共振,  $n$  为正整数.
  - (2)  $k \approx n\omega$ , 超谐共振.
  - (3)  $m_1 k_1 + \dots + m_g k_g + n_1 \omega_1 + \dots + n_p \omega_p \approx 0$ , 组合共振.
  - (4)  $m_1^{(s)} k_1 + \dots + m_g^{(s)} k_g + n_1^{(s)} \omega_1 + \dots + n_p^{(s)} \omega_p \approx 0, s = 1, 2, \dots, r$
- (4) 的共振关系式是  $r$  个联立线性代数方程组, 这种共振称为多重共振.

多重共振的发生需要两个方面的条件, 一方面是满足式 (4) 的数学关系, 另一方面要求系统的模态具有适当的耦合关系.

文 [49] 研究了多自由度非线性振动的近似周期解, 首次提出了多重共振的概念及其关系式. 文 [50, 51] 把非线性振动理论中的平均法和分析力学方法相结合, 找到了弹性体非线性振动多重共振的能量法, 应用此方法, 若能找到振动系统非线性干扰力的功, 就能求得非线性系统多重共振的一次近似和精确近似解, 而不需要建立弹性体振动的偏微分方程, 此方法同样也

可以求解多自由度系统的多重共振问题. 文 [52] 研究了二自由度具有内共振关系的强迫振动系统, 得到了具有 M 形的幅频特性的理论结果, 这实际上就是二重共振问题, 此后在文 [53] 中又进行了实验研究, 使呈 M 形的频响特性及呈现饱和的力响特性得到了实验证实. 文 [54] 研究了同时满足内共振、组合内共振与单频共振的三重共振, 发现当满足两个内共振关系时, 存在双饱和现象, 可以观察到高阶模态的振动能量, 通过内共振关系传给低阶模态, 使不受外力激励的低阶模态逐渐产生大振幅的振动, 得到了在共振区中 3 个模态振幅及其稳定性丰富的振动特性, 理论结果均得到了实验的验证.

由于电机轴系的弯曲和扭转振动系统具有多个固有频率和受多个频率的电磁力、力矩作用, 因此很有可能发生各种多重共振问题. 文 [51] 研究了固有频率分裂为二的单频双重共振, 由于 2 个模态相互耦合的结果, 使 2 个模态的共振区间及振幅均比单重共振明显加宽、加大, 还出现了拍振现象. 文 [55] 研究了隐极电机转子在三相不对称运行情况下的双频双重共振, 由于模态的耦合, 也得到了 2 个振动模态之间能量交换及调幅的频拍振动. 以上的结果均得到了实验的验证. 文 [56] 应用文 [51] 的能量法研究了汽轮发电机组弹性体轴系的扭振多重共振, 得到了三分之一亚谐共振与组合共振的双重共振. 文 [57] 研究了发电机并网不对称运行时转子轴系扭振的多重共振, 得到了内共振与单频共振的双重共振存在饱和现象及 M 形幅频曲线. 文 [58] 应用弯扭联合问题的多重共振理论, 得到了大型汽轮发电机组 19 Hz 的低频振动的机理.

### 3.3 电机的机电耦联非线性动力学问题

机电耦联动力学问题的特点是转子轴系的振动微分方程和电机电流的微分方程相互交叉耦合, 形成统一的微分方程组系统, 也就是说转子系统的动力学和电机的瞬变理论是紧密相耦联的. 如何正确的建立这种数学系统以及如何求得数学解是两大基本难点. 在文 [59~68] 中分别对交流电动机和同步发电机的机电耦合动力学进行了研究, 把非线性振动理论与电机的瞬变理论有机结合, 创立了新的研究领域.

文献 [59~61, 64, 67] 对交流电动机的机电耦合动力学问题进行了理论和实验研究. 建立方程组的方法是首先由电磁理论及给定的边界条件求得电机气隙磁场, 据此求得气隙磁场能量函数, 再和振动系统的动能、势能一起, 应用机电分析动力学的方法, 建立此机电耦合的方程组. 应用线性变换及非线性变换的数学方法, 得到了这些强非线性方程组的解. 对电动机启动过程的径向电磁力、电磁力矩、扭振及横振进行了理论和实验研究, 得到了经过实验验证的各种规律. 发现电动机在启动过程中电流及扭振很大, 比共振的量级还大, 找到了电动机启动过程强大噪声的原因所在. 发现激发扭振的交变电磁力矩的幅值比电机额定扭矩大 4~5 倍, 其频率为 50 Hz, 若轴系扭振固有频率和其相近, 极易使轴扭断. 发现频率为 100 Hz 的交变电磁力随气隙偏心的增加而显著变大, 当偏心超过一定限度, 易使转子碰磨定子而造成事故.

文献 [65, 66, 68, 69] 对汽轮发电机及水轮发电机的机电耦合动力学进行了理论研究和必要的实验研究. 对三相突然短路、二相线间短路及一相对中短路等电气故障的瞬变过程进行了研究, 得到了电流、电磁力矩、转速、扭振及轴段间的扭矩瞬变变化规律, 并研究了激磁电流、定子电阻对瞬变过程的影响. 理论结果和实验结果发现, 有的电气故障, 其电磁力矩及其产生的轴段扭振力矩可达额定扭矩的数倍. 研究结果, 对汽轮发电机组及水轮发电机组损伤程度的估计有重大价值, 对防止发电机组的重大破坏事故有重大意义.

汽轮发电机组的发电机转子是较长的弹性轴, 不能看成集中质量, 需用分布参数的偏微分方程描述, 两者如何建立扭振的机电耦联关系是一个没有很好解决的问题, 在文 [68] 中找到了一个解决的办法. 文 [66] 考虑到同步发电机磁场饱和带来的电磁非线性关系, 得到了电机瞬变

理论的非线性数学模型, 可扩宽电机瞬变理论及机电耦联动力学研究范围.

#### 4 机电耦联非线性动力学研究的展望

汽轮发电机组及水轮发电机组向超大型发展, 在生产、运行中特有的机电耦联动力学、振动、稳定性问题将会不断地提出来. 特别是高压、大电流的进一步提高, 会产生强大的磁场及电场, 机组在强大的磁场、电场作用下会使转子系统的机电耦联振动、稳定性及动强度出现新的问题. 由于磁场及电场强度的提高, 电机定子壳体的磁应力张量、电应力张量也将增加, 电机定子的磁、固耦合振动及稳定性等动力学问题将会提到日程上来. 发电机及变压器的母线也必须考虑到磁、固耦合动力学问题. 混沌科学的研究在自然科学、社会科学领域全面的展开. 虽然在一些科学先进国家中研究湍流、非线性动力学的教授们对混沌的研究没有那么热衷了, 认为这是数学家的事情, 但是对发电机转子轴系破坏的非线性混沌机理的实验与理论相结合的研究工作仍然是有吸引力的, 因为我们国家在汽轮发电机组发生的重大毁机事故中已经支付了一大笔学费.

磁浮轴承的研究已经有了很大的发展, 已经召开了三、四次相关的国际学术会议, 国外已经应用到大型高速动力机械上, 已有商品. 法国研制的大型磁浮轴承, 已在 90 万 kW 汽轮发电机轴承上进行试验, 对机组的振动控制、监测等问题有很多的优越性. 因此对磁浮轴承的机电动力学与控制系统相耦联的非线性动力学的研究是有发展前景和应用价值的.

高速磁浮列车的研制在几个国家已经取得显著进展, 我们国家也进行了小型机的试制. 对磁力悬浮、直线电机驱动及其控制系统相耦合的机电系统非线性动力学的研究也是一个有意义的课题. 磁炮、磁力发射装置的研究, 磁力运送的研制等都是有新意的课题.

高温超导材料研究的成果, 将使超导电机的生产带来希望, 它的大电流、强磁场将会给电机结构的动力稳定性、振动问题, 带来新的研究课题. 超导结构材料的动力与静力稳定性是一个需要解决的突出问题.

为寻找更有效的生产电能的方法, 试图研制一种利用膨胀热气体作为运动导体的磁流体动力式发电机. 还有一种是利用带电粒子和不导电流动气体之间的相互作用得到一种电流体动力的发电方式, 这种发电机为医院治疗、物理学研究提供了 2000 万 V 的极高电压. 利用磁流体动力或电流体动力来加速物质以获得推力, 应用于太空方面的机电推进方案也在研究发展之中.

#### 参 考 文 献

- 1 邱家俊编著. 机电分析动力学. 北京: 科学出版社, 1992. 1~582
- 2 Неймарк Ю И. Динамика Неголомных Систем. 1967
- 3 Мартыненко Ю Г. Аналитическа Динамика Электромеханических Систем. Московский Энергетический Институт. 1984
- 4 邱家俊. 机电耦联动力系统的非线性振动. 北京: 科学出版社, 1996. 1~663
- 5 Woodson H H. Electromechanical Dynamics. New York: John Wiley and Sons, Inc, 1968
- 6 Hammond P. Energy Method in Electromagnetism. Press Oxford, 1981
- 7 邱家俊. 机电系统耦联动力学问题. 见: 结构与介质相互作用论文集. 南京: 河海大学出版社, 1993. 157~174
- 8 邱家俊. 机电耦联的非线性振动问题. 见: 全国振动理论与应用会议论文集. 1993. 315~324
- 9 邱家俊, 杨志安. 电磁非线性的拉格朗日-麦克斯韦方程的推广. 见: 一般力学论文集. 北京: 北京大学出版社, 1994. 174~175
- 10 布克 H G. 电磁场中的能量. 北京: 高等教育出版社, 1988
- 11 Palite B B. 用坡印亭向量和气隙中的电磁能流对电机进行研究 (讲学材料). 1982
- 12 Бердический В Л. Вариационные Принципы Меаника Сполощной Среды. Москва Наука, 1983

- 13 Салтанов Н В. Аналитическая Гидромеханика. Наукова Думка, 1984
- 14 Андронов А А. Теория Колебаний. Хивмат Гиз, 1959
- 15 Боголюбов Н Н, Митропольский Ю А. Асимптотические Методы в Теориях Ненинейных Колебаний. Наука, 1974, Изд. 4~е, М
- 16 Малкин М Г. Некоторые Задач теорий ненинейных колебаний. М, Гостехиздат, 1956
- 17 Nayfeh A H, Mook D T. Nonlinear Oscillations. Wiley Interscience, 1979
- 18 戴世强, 应峰青. 一类非线性振动系统的渐近解. 中国科学, 1986, A(1): 34~40
- 19 徐兆. 非线性力学中一种渐近方法. 力学学报, 1985, 17: 267~271
- 20 戴世强. 强非线性振子的渐近解. 应用数学和力学, 1985, b: 395~400
- 21 李疆, 马兴瑞. 强非线性振动系统求解的两种解析方法. 应用力学学报, 1987, 4(2): 11~17
- 22 周焕文. 参数展开摄动法. 数学物理学报, 1983 (3)
- 23 李疆. 强非线性系统的频闪法. 力学学报, 1990, 22(4): 402~412
- 24 戴德成, 陈建彪. 强非线性系统的渐近解法. 力学学报, 1990, 22(2): 206~212
- 25 秦元勋. 常微分方程的区域分析法. 数学学报, 1956, b: 402~412
- 26 李疆. 强非线性振动系统的定性理论与定量方法. 北京: 科学出版社, 1997
- 27 Looss G, Joseph D. Elementary Stability and Bifurcation Theory. New York: Springer-Verlag, 1980
- 28 Guckenheimer J, Holmes P. Nonlinear Oscillation, Dynamical System and Bifurcation of Vector Field. New York: Springer-Verlag, 1983
- 29 Chow S N, Hale J K. Methods of Bifurcation Theory. New York: Springer-Verlag, 1983
- 30 Wiggins S. Global Bifurcation and Chaos Applied Method. New York: Springer-Verlag, 1988
- 31 Carr J. Application of Center Manifold Theory. New York: New York: Springer-Verlag, 1981
- 32 Holder A V. Chaos. Manchester University Press, 1986
- 33 Peitgen H O. Fractals for the Classroom, Introduction to Fractals and Chaos. New York: Springer-Verlag, 1992
- 34 Sparrow C. The Loreng Equations. New York: Springer-Verlag, 1982
- 35 Wiggins S. Introduction to Applied Nonlinear Dynamical Systems and Chaos. New York: Springer-Verlag, 1990
- 36 Teman R. Infinite-dimensional Dynamical Systems in Mechanics and Physics. Springer-Verlag, 1988
- 37 邱家俊. 交流电机由电磁力激发的参、强联合共振. 力学学报, 1989, 21(1): 49~57
- 38 邱家俊. 电机的电磁参数对转子共振的影响. 固体力学学报, 1989, (1): 65~70
- 39 邱家俊. 交流电机电磁力激发的非线性振动. 中国电机工程学报, 1989 (2)
- 40 邱家俊. 低速交流电机由非线性电磁力激发的参数共振. 应用科学学报, 1993 (2): 171~179
- 41 邱家俊. 汽轮发电机转子由电磁力激发的参数振动、运动稳定性及减振的研究. 天津大学学报, 1980 (3): 88~110
- 42 邱家俊. 汽轮发电机转子由电磁力激发的参数振动规律. 天津大学学报, 1981 (4): 83~96
- 43 邱家俊. 电机转子与定子当有功、无功负载变化由电磁参数激发的参数振动研究. 机械强度, 1979 (7): 80~87
- 44 邱家俊, 张立江. 同步发电机轴系扭振的参、强联合共振. CVA93 论文集. 332~336
- 45 邱家俊, 杨志安. 考虑发电机的磁饱和特性时转子轴系的弯扭联合振动. 黄淮学刊, 自然科学版, 1995, 11(2)
- 46 邱家俊, 邱宇. 发电机空载稳态不对称运行扭振参数共振. 非线性动力学论文集. 北京: 中国科学技术出版社, 1995
- 47 Qiu Jiajun. The self-excited oscillation of the electrical and mechanical coupling of the synchronous generator. In: Proceedings of the International Conference on Hydrodynamic Bearing-Rotor System Dynamics, 1990. 9. 866~871
- 48 Qiu Jiajun. Combination of parameter resonances and forced resonances excited by electromagnetic forces in a high-speed alternating current machines. In: Proceedings of International Conference of Mechanical Dynamics. 1987, 8. 356~360
- 49 Кушувль М Я. О почти—периодических решениях кваэылинейных систем, при многократном резонансе, к теориям автоколебаний роторов. Изв АН СССР, отн. Механика и Машиностроение, 1960 (1)
- 50 邱家俊. 弹性体非线性振动多重共振近似周期的能量法. 见: 全国第一届非线性振动学术会议. 1980
- 51 邱家俊. 弹性体非线性振动多重共振的能量法. 力学学报, 1990, 22(6): 753~758
- 52 Nayfeh A H, Mook D T. Nonlinear Oscillation. New York: Wiley-interscience, 1979
- 53 Nayfeh A H. A Experimental investigation of complicated responses of a two degree of freedom structure. *Journal of Applied Mechanics*, 1989, 56: 960~967
- 54 邱家俊, 杨志安. 发电机组轴系扭振模化系统的三重共振的理论与实验研究. 力学学报, 1997, 29(6): 733~739
- 55 宋敏君, 邱家俊. 隐极同步发电机由电磁力激发的双重共振. 见: 第二届全国转子动力学论文集, 1989. 547~551

- 56 蔡赣华, 邱家俊. 汽轮发电机组轴系由电磁参数激发的多重共振. 见: 第四届全国转子动力学论文集, 1995. 34~39
- 57 杨志安, 邱家俊. 发电机并网不对称运行转子轴系扭振多重共振. 见: 第四届全国转子动力学论文集, 1995. 40~44
- 58 杨志安, 邱家俊. 大型汽轮发电机组电磁激发弯扭耦合振动及轴系低频振动机理研究. 见: 全国第六届振动理论与应用会议文集, 1997. 549~550
- 59 邱家俊. 机电耦联系统的非线性振动. 见: 非线性动力学文集. 北京: 中国科学技术出版社, 1992. 180~186
- 60 Qiu Jiajun. The transverse and torsional vibration of alternating current machines in the starting process. *Acta Mechanica Sinica*, 1988, 4(1): 45~58
- 61 邱家俊. 交流电动机启动过程的扭振及电振荡. 应用力学学报, 1989 (4): 11~16
- 62 Palit B B. A model of asynchronous machine with psc stator and rotor coils, its transformation and its set of equations. *Sciential Electrical*, 1975, 21(4)
- 63 Peeken H. Torsional vibration during the starting process in driving system with three phase motors. In: The Second of International Conference on Vibration Rotating Machinery, 1980
- 64 邱家俊. 交流电动机启动过程的横振和扭振荡. 力学学报, 1989, 21(4): 432~441
- 65 邱家俊, 白玲. 同步发电机组机电耦联的非线性振动. VTA 93 论文集. 325~331
- 66 邱家俊, 邱宇. 考虑电磁非线性时机电耦联的动力学问题. 见: 一般力学论文集. 北京: 北京大学出版社, 1994. 130~136
- 67 邱家俊. 高维机电耦联系统的非线性振动. 振动工程学报, 1994, 7(2): 133~143
- 68 邱家俊, 邱宇. 汽轮发电机组弹性轴系机电耦联的扭振. 非线性动力学论文集. 北京: 中国科学技术出版社, 1995
- 69 邱家俊, 邱宇. 水轮发电机组短路故障时机电耦联的扭振问题研究. 见: 第六届全国振动理论与应用会议文集, 1997. 533~537

## RESEARCH ADVANCES OF COUPLED MECHANICAL AND ELECTRIC DYNAMICS

Qiu Jiajun

Dept. of Mechanics and Engineering Measurement, Tianjin University, Tianjin 300072

**Abstract** In this paper, the main domains of the dynamics of both the electro-mechanical and coupled mechanical and electric systems are introduced concisely. Two basic problems in the research of the coupled mechanical and electric nonlinear dynamics are described. The outcome of scientific researches on four aspects in nonlinear vibration and nonlinear dynamics of coupled mechanical and electric systems whose nuclei are electric machines is reviewed systematically. At last, the future research trends are outlined.

**Keywords** mechanico-electric coupling, parametric resonance, multiple resonance, unstable oscillation