



国家自然科学基金项目 (51605022)
北京建筑大学学术著作出版基金资助出版

同步技术工程应用

Application of Synchronization Technology in Engineering

张楠 侯晓林 著

中国建筑工业出版社

国家自然科学基金项目 (51605022)
北京建筑大学学术著作出版基金资助出版

同步技术工程应用

Application of Synchronization Technology in Engineering

张楠 侯晓林 著



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

同步技术工程应用/张楠, 侯晓林著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2016. 9
ISBN 978-7-112-19492-6

I. ①同… II. ①张… ②侯… III. ①电机-同步控制
制系统-研究 IV. ①TM301.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 128811 号

本书是在完成“多电机驱动的自同步振动机同步的若干理论及试验”、“节肢振动筛动力学特性及运动仿真分析”等科学研究及相关科研项目的基础上, 撰写的一部专著。书中以机械系统动力学理论为基础, 研究了双机或多机机械系统的振动同步、机电耦合同步及稳定性问题。书中较详细地研究了实现振动同步的基本理论与方法及具体措施, 介绍作者长期从事这一课题研究的工程实践经验, 在讲述理论与方法的过程中, 举出了工程应用实例。

本书可供从事机械工程与动力学研究与设计的科技人员参考。

责任编辑: 石枫华 兰丽婷

责任设计: 李志立

责任校对: 王宇枢 张 颖

同步技术工程应用

张楠 侯晓林 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 8½ 字数: 207 千字

2016 年 10 月第一版 2016 年 10 月第一次印刷

定价: 30.00 元

ISBN 978-7-112-19492-6

(28799)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前言

在自然界与工程技术部门,同步现象和同步问题随处可见。在自然界中,同一类花卉常常在同一时间开放;葵花总是随着太阳的位置的变化而同时改变它们的朝向;海潮总是跟随月亮的位置的变化周而复始地涨落;夏天的夜晚人们可以看到许多萤火虫以同一频率同时同步闪亮;多条海豚依靠它们之间的密切联系而完成精彩的同步表演;宇宙空间,星系中的许多星球在同步运行。在工程技术部门,到处都可以见到各种形式的同步现象和遇到许多同步问题,例如,时钟及其他计量设备和装置常常要求它们与标准的仪器设备的计量参数接近相同或相等。在机械工业部门,许多机械设备,常常要求其中的两个或两个以上的工作部件,如转轴、机构、杆件、油缸活塞等具有相同的速度、位移、加速度、相位及作用力等,即要求它们在同步状态下运行,进而完成所需的工作过程,还有许许多多的机器,如双电机驱动或多电机驱动的振动给料机、振动输送机、振动筛、振动干燥机、振动冷却机、振动打桩机、同步轧机、拉伸式矫直机、双滚筒驱动的带式输送机、辊式破碎机、造纸机、煤球机、桥式与龙门起重机、液压顶升机、飞剪机以及水坝和船坞的闸门等,都要求其内部的两个或两个以上的部件实现同步运转;再例如长江三峡的升船机,由于功率过大,须采用多个电机同时驱动,要求它们在工作时每个电机所带动的钢绳具有接近相同的速度和相同的负荷。诸如此类的工程实例,不胜枚举。为了实现同步,必须在所研究的多个对象间加上某种约束或实现某种联系,最常见的约束方式和方法是,机械的方法、动力学的方法或控制的方法等。

为了保证这类机械有效地和安全可靠地运行,对同步理论、方法和技术进行详细的研究,以揭示同步运转的机理,这不仅在学术上有重要价值,而且具有重大的实用意义。

本书共分6章,首先介绍自然界与工程技术部门中的同步现象、同步问题和振动同步理论与技术的发展等问题;第2章,阐述自同步振动机的同步理论问题;第3章,利用试验和仿真结果,展现机电耦合情况下自同步振动机同步特性;第4章、第5章,阐述自同步振动系统的平衡点分岔特性和频率俘获特性;第6章,研究振动同步理论及技术在工程中的应用等。本着“易读,好学”的专著写作目的,本书在章节设计上,每章的开头都有一个知识概述,这样有助于读者把握各篇的重点,理清章节之间的联系,也便于掌握知识要点。本书会有不足之处,望读者批评指正。

本书由“北京建筑大学学术著作出版基金资助出版”,在此表示感谢。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 工程技术中的同步现象	1
1.2 振动同步理论和技术的发展	2
1.3 机电耦合振动同步理论和技术的发展	5
1.4 广义同步理论的发展	7
1.5 展望	8
第 2 章 自同步振动机的同步理论	9
2.1 概述	9
2.2 四电机驱动自同步振动机的同步理论	9
2.3 双电机驱动自同步振动机的同步理论	18
2.4 三电机驱动自同步振动机的同步理论	21
2.5 本章小结	24
第 3 章 机电耦合情况下振动机同步特性	25
3.1 概述	25
3.2 振动机机电耦合模型的具体情况	26
3.3 双电机驱动自同步振动机的机电耦合模型	28
3.4 三电机驱动自同步振动机的机电耦合模型	31
3.5 双电机驱动自同步振动机机电耦合情况下的自同步特性	33
3.6 三电机驱动自同步振动机机电耦合情况下的自同步特性	52
3.7 双电磁激振器振动机机电耦合情况下的自同步特性	61
3.8 本章小结	64
第 4 章 自同步振动系统的运动规律分析	66
4.1 概述	66
4.2 三转子自同步振动系统动力学分析	66
4.3 三转子自同步振动系统的同步必要性条件	69
4.4 三转子自同步振动系统的平衡点稳定性	70
4.5 三转子自同步振动系统的平衡点分岔特性	72
4.6 本章小结	74
第 5 章 延迟自同步和频率俘获研究	75
5.1 概述	75
5.2 耦合振动系统的延迟自同步研究	75
5.3 非线性振动系统的频率俘获特性	86

5.4 本章小结	95
第 6 章 同步特性在工程中的应用	96
6.1 概述	96
6.2 振动筛多机同步稳定性分析	96
6.3 振动筛有限元分析	107
6.4 振动筛的运动仿真分析	117
6.5 小结	124
参考文献	125

第1章 绪 论

1.1 工程技术中的同步现象

同步是自然界、人类社会及工程技术部门中客观存在的一种运动形式,是指两个或两个以上的物件、物体或所观察的对象实现相同或相似的运动形式或物理形态,如相同的速度、相位和运动轨迹等。从最初发现的钟摆同步到控制、混沌以及协同同步,由于同步现象可以用同步理论很好地解释,因此,受到人们越来越多的关注。同步作为自然界中普遍存在的一种“有序”的物理现象,与自然科学中的许多基本概念密切相关。除机械摆钟的同步振荡等外,自然界中还广泛存在着其他同步现象,例如,生命科学中心脏起搏细胞的同步跳动,自然界中大量萤火虫的同步发光,蟋蟀的齐声鸣叫,粒子物理中的同步辐射,激光列阵的相位锁定现象以及化学溶液系统中的自同步震荡等。这些不同现象中的共性规律可能蕴涵了自然界中普遍存在的某种统一的基本规律。典型的工程例子是:在有能量输入和耗散阻尼的条件下,由多台激振电机和振动机机体组成的自同步系统可以通过子系统之间的非线性耦合作用,使振动系统实现自同步。在这里,同步作为事物自行组织的一种协调有序的行为,与统计物理学中的耗散结构理论、协同学说和自组织理论中的许多概念之间有着十分相似和相近的关系。统计物理学中的许多概念和思想可对同步问题的研究起到启发和借鉴作用。同步也可在反映牛顿力学和统计力学中的一些共性规律方面发挥桥梁纽带作用。

工程技术领域,时钟和各种计量仪器与装置中存在同步现象;为了使收音机能接收到电台发射出的信息,其接收频率必须与发射台发出的信号频率接近相等;许多机械设备,常常要求它们中间的两个或两个以上的工作部件实现同步运转,这类机械有双激振器式振动给料机、振动输送机、振动筛、振动干燥机、振动冷却机、振动打桩机、同步轧机、拉伸式矫直机、双滚筒驱动的带式输送机、辊式破碎机、造纸机、煤球机、桥式与龙门起重机、液压顶升机、飞剪机、纺织机的纱锭以及水坝和船坞的闸门等;三峡所使用的升船机,由于采用多台电机同时驱动,这就要求在工作时每个电机所带动的钢绳具有接近相同的速度和相同的负荷,即要求实现同步运转。

系统的自同步是一种特殊的振动现象,更加需要进一步的研究和分析。自同步振动机是一类广泛应用于冶金、煤炭和建材行业的高效率工作机器,它通过无直接机械联结的两台或多台电机带动激振偏心块同步运转,能够保证振动机械按预定轨迹稳定运动,实现它的自同步特性。在自同步振动机械中,其振动系统能够自我调整重新实现该系统的自同步行为特性,即使在两个偏心转子的初始相位差不同或者电机的转子初始转速以及两个或两个以上的电机参数有差异时,振动机械仍然能够通过自我调整重新实现自同步这种特殊的

振动现象。又如，对于已经实现同步运转的该类系统，在一定范围条件下，如果切断一台或多台电机的电源，系统电机的转速经历了一个急剧的波动后，其两台或多台电机仍能通过自身调节恢复了系统自同步稳定运转状态。非线性振动系统中会出现频率俘获的特殊现象。带偏心块的电机转子的转频由零提高到振动机的固有频率附近时，其转速会被系统的固有频率所“俘获”，不能继续上升到额定转速。显然要解释这些物理现象，更需要对自同步振动系统的自同步行为进行研究和分析。

随着科学技术的发展，振动同步也不是单纯的机械传动同步，而演变到机械和电机的耦合状态下的同步运转。对于自同步振动系统，当双电机的偏心块的相位差在某些区间时，如果通过控制系统指令相位落后的电机追赶相位超前的电机，反而会出现“越追越远”的局面，而采用“先等后追”的策略，则能受到好的控制效果。正是基于这一认识，通过模拟对自同步振动系统本身的动力学特性进行了系统深入的研究，从不同层次上研究不同参数情况下系统同步特性的变化规律，为今后更好地实现同步智能控制打下坚实的力学基础。随着电机的不断进行，对于振动系统的自同步理论的研究已经不是单纯的研究机械动力学问题，需要机械动力学和电机理论两方面的知识，将使机械系统的自同步理论不断地拓广发展。随着各国对工业应用研究的日益重视和非线性微分方程理论、计算数学和计算机技术的蓬勃发展，研究机电传动系统的动力学问题的客观条件在 1960 年代后期已经成熟。将振动同步理论拓广到控制同步、智能同步、振动同步与控制同步结合的复合同步，以及协同同步的理论。同步的发展经历了几个阶段：

(1) 最古老的同步方式是利用刚性传动（齿轮传动）或柔性传动（如链或带式传动）来实现同步。关于该种的同步方式发展于 1960 年代。在工业部门中，使两根或多根回转轴获得方向相同（或相反）的回转，而它们的转速成一定比例或者相等，以满足所需的工艺要求。这种传动方式存在结构复杂、传动系统需要经常维修和工作时噪声大等缺点。

(2) 第二阶段的同步方式是振动同步（对于双激振器式振动机）与电轴同步（对一般机械）。在机械系统中，两台或多台异步电动机分别驱动的两根或多根转动轴进行自同步传动，在振动机器中，称为振动同步传动。

(3) 第三代同步传动是基于经典控制理论的控制同步和智能控制理论。1970 年代末至 1980 年代，由于计算机技术及控制理论的发展，在机械系统同步传动中，采用控制理论与计算机技术，不仅可以大大提高定速比传动和同步控制的精确度，而且还可以拓宽实现定速比和同步传动的条件，扩大它的应用范围。因此，基于经典控制理论的控制同步传动是振动同步与电轴同步传动的进一步发展。到了 1990 年代，随着科学技术的进步，控制理论及技术正在向智能化方向发展。

1.2 振动同步理论和技术的发展

自同步振动机械系统的发明首先源于自同步现象的发现。1665 年荷兰物理学家、摆钟的发明者 Huygens 发现：两个并排悬挂的钟摆在震荡一段时间之后能够实现完全同步。他在用两台挂钟做试验，试验发现：在满足一定条件下，可摆动的薄板上同时挂上两台挂钟，此时这两个挂钟的摆同步摆动；但挂在静止的墙壁上，则两时钟却失去同步，由此同

步定义为两个系统的相位保持一致的状态。至此,关于同步现象的发现,也被在更多领域的科学工作者发现。例如,在从 1894~1922 年期间,在电子电路方面上, Rayleigh、Vincent、Moller、Appletont、Van der Pol 发现,非线性电路系统中存在特殊的同步现象,他们并称这种现象为“频率俘获”。在线性系统中,当系统接近共振工作时,强迫频率 ν 与固有频率 ω 两种频率的振动同时都会产生,因而线性系统会出现所谓的“拍振”;而非线性系统中的系统接近共振工作时,其固有频率 ω 常常被强迫振动频率 ν 所俘获,此时系统只能出现频率为 ν 的振动;因此频率俘获(或称为同步)是非线性振动系统的特有现象。

关于工程振动机械最有显著代表性的一类同步系统是 20 世纪 60 年代,苏联 Blehman 博士提出了双激振器振动机的同步理论。Blekhman 和他的同事一起首先利用两台无强迫联结、带偏心块的电机驱动同一台振动机工作,此称为两台感应电动机分别驱动两个惯性激振器,当满足一定条件,两个惯性激振器可以实现同步运转,这样其采用电动机传动的方式代替了齿轮同步传动,使振动同步理论进一步发展。并由试验研究发现,当系统受到外界干扰导致双电机的转速或相位差发生变化时,振动系统可以通过自我调整而重新实现同步。此后,他们进一步发现,对于已经实现同步运转的振动机械系统,如果切断一台电机的电源,两台电机仍然能够在速度稍低的水平上同步运行。随着同步技术和非线性技术的逐渐成熟,1970 年代中后期,自同步理论相继在苏联、德国和日本成为当时的学术热点。在 1980 年,日本 Inoue 和 Araki 科学工作者,将“同步”与“频率俘获”两个概念等同起来,并在两电动机驱动的平面振动机系统中研究了三倍频率同步问题。我国学者也提出了在某些非线性系统中,也能够实现各次谐波的倍频同步,指出振动体不但可以实现 n 次倍频同步,而且还可以获得次谐波的降频同步。Wauer 研究了经过共振区的旋转杆的振动同步问题。

我国学者也于同期开展了系统的研究工作,并于 1982 年出版了国内该领域的第一部专著。此后同步问题的理论研究开始逐步转向控制同步领域。在这些研究文献中,中国科学家闻邦椿巧妙地采用积分平均的思想从平均意义上求得了自同步振动机械的同步工作条件和稳定性条件。并将这一思想延续到其他的振动体上。例如,运用这一思想在平面双激振器的振动同步参数分析中;采用这一思想求得了平面单质体自同步振动机的同步稳定性条件;在此基础上,运用这一思想,指出了弹性连杆式振动机的同步工作条件及同步状态下的同步稳定性条件。1983 年,闻邦椿首先阐明了振动同步传动的新原理及其实现的条件,并且通过工业试验得到具体结果,最终导出了激振器偏移式自同步振动机的同步性判据,同步状态稳定性判据及机体的运动轨迹公式;并提出了非线性自同步振动机实现高次谐波同步和次谐波同步的同步状态的稳定性判据,在此基础上设计及研制成工业的大型冷矿筛,开创了振动同步理论的新篇章。随后,采用 Hamilton 原理推导同步理论方法推导出空间单质体振动系统的同步工作条件和稳定性条件以及双质体自同步振动椭圆系统的同步理论,为自同步机械的设计及调试奠定了理论基础。

在 1985 年期间,陈宇明提出了自同步振动机同步参数的概念,并且研究了同步参数初值的确定及存在的必要条件,由转子方程的周期解获得同步参数的稳定值及各运动状态参数的渐进解,重要的是该理论也可以应用于多转子系统中。同年,纪盛青首次将自同步振动机简化为具有六自由度的系统,并建立振动微分方程,讨论了系统的固有特性并用试

验证该理论的正确性。随后,吕富强也通过六自由度的平面双质体自同步振动系统的同步理论,研究出了该系统的同步性条件及同步状态稳定性条件。段志善从能量传递的角度分析了振动同步传动的物理过程,并进行了试验研究。李宗斌提出了振动给料机同步性判据和稳定性判据的计算公式。陆信则利用哈密顿原理定量分析了一种重型自同步振动筛振动方向角过大的原因,并且提出了相应的计算公式决定着激振器移动的位置才能保证振动方向角正确的理论。

在20世纪90年代,振动同步理论得到的广泛的发展。首先,从理论上分析了两转子自同步振动机械的非线性动力学特性并且给出了自同步稳定运动的条件;其次,引入各种数学变换手段求出了双液压转子驱动的自同步振动机的同步条件和稳定性条件,指出系统在同步状态时两偏心转子的转速围绕平均转速作小幅波动,带有液压马达驱动的双偏心转子激振器的自同步运动,液压马达的流量差决定了两偏心转子回转速度的相位差;再次,研究了迟滞共振发生的原因,并得到了如果振动机的阻尼很小,固有频率成分的振动衰减很慢,迟滞共振必然会持续很长的时间。振动同步理论发展的同时也伴随着控制同步的发展,以智能控制为纽带,将机械动力学和现代控制理论有机结合在一起,实现了电机偏心转子在不同相位条件下的同步控制,其原理和思想可以推广到许多实际的多电机机械系统之中,比如,有些学者提出了对同向回转自同步振动机实行零相位差控制同步理论。在此基础上,又提出了按运动跟踪设计双机传动机械系统同步控制的控制策略及变结构复合控制方法。随后,有些学者还推导出了控制同步不仅可以消除由质心偏移、电机特性差等原因引起的稳态相位差,同时还能大大降低瞬态相位差,减小机体的摇摆振动。赵春雨通过外负载辨识结果和速度PID控制确定感应电动机的转矩电流,对每个感应电动机实行无速度传感器磁场定向控制,能够使多个感应电动机同时跟踪同一个指令性速度,实现多个转子的同步运行;并且还通过计算机仿真,提出了同向回转双机自同步振动系统中两个偏心转子的相位差的模糊监督控制方法。

21世纪以来,振动同步的研究不断深入和扩展。在2002年Blekhman进一步用具体的实例总结了振动系统的自同步特性与控制同步的定义。研究系统中子系统之间运动作用的特征、子系统之间运动作用对系统动力学行为的影响是复杂系统科学的重要内容。另外,我国学者也以近同步状态为研究出发点,以转子输出功率为中介,建立了两个转子之间的转速联系,推导得到了系统在近同步状态下的同步条件及稳定性判据。同年他还利用自同步振动系统的机电耦合数学系统定量揭示了非理想系统起动过程中的一种特殊物理现象——回转频率俘获。还有学者通过数值仿真计算,研究了激振器的偏心矩、电机功率、偏心转子回转摩擦阻矩等几种参数变化情况下系统同步运动的特点及其对同步形成发展的影响。同时,在自同步振动系统运动方程的基础上,导出了关于两偏心转子相位差角的微分方程,针对该方程建立了同步运动的必要性条件,并分析了系统平衡点的稳定性及分岔特性。随后,又通过把双偏心回转式激振器驱动的平面同步振动筛简化为一个双转子自同步系统,并定义了一个同步系数,用它来定量描述双转子回转的同步程度。

在机械工业的各个部门,振动同步与控制同步得到了广泛的应用。主要的研究有双机及多机系统的振动同步、双机机械系统的控制同步、定速比控制传动、复合同步、多机系统的控制同步及多个液压油缸的控制同步等。由于同步经常与系统的非线性特性联系在一起,现在已有不少研究者开始进行非线性系统的混沌同步研究。近几年,国外将机械动力

学和现代控制理论有机结合,在控制同步和非线性特性联系在一起的混沌同步方面已有许多研究,并且有些文献已把同步力学特性应用于生物工程当中,这些研究拓宽了同步的发展领域。例如, Tomizuka 提出了两个进给的电机轴控制同步问题; Re 研究了一空间和时间上的自适应同步控制理论及试验; Rafikov 提出了在非线性混沌系统中应用控制同步的方法。对于具有振动同步特性的自同步振动机的研究中,自同步振动机有做平面运动的和做空间运动的,有单质体的和双质体的,有非共振的和近共振工作的,有线性的和非线性的等等,除此以外,还有 2 倍频同步和 3 倍频同步的自同步振动机。从工程应用的实际情况来看,双机传动已扩展到多机传动,振动同步已经扩展到广义同步。复杂系统动力学设计进一步提出了各子系统之间的“协调同步”问题,如动力系统、传动系统、执行系统和控制系统的“协同”问题。

1.3 机电耦合振动同步理论和技术的发展

机电耦合本身是一个经典问题,从 1832 年 Pixii. H 做成永磁发电机和 1888 年多布罗斯基发明电动机即已产生。研究机电耦合传动系统的动力学问题的基本理论——拉格朗日分析力学和麦克斯韦的电磁场理论(1873 年)也早已形成;到电机系统的派克模型建立、电机拖动理论和过渡过程理论逐步成熟、转子动力学的基本理论出现,可以说从理论上已经具备了研究传动系统中的机电耦合问题的基本条件。

尽管从 20 世纪初期已经出现机电耦合方面的研究工作,但还没有系统深入的研究成果出现。随着各国对工业应用研究的日益重视和非线性微分方程理论、计算数学和计算机技术的蓬勃发展,研究机电耦合动力学问题的客观条件在 20 世纪 60 年代后期已经成熟。针对机电耦合的研究领域必须具备机械动力学和电机理论两方面的知识,也需要具备试验和仿真计算方法,来进行不断地研究,才能获得卓越成果。机电耦合振动系统是按照电机电磁转矩的响应非平稳过程的特性来进行解释。一种是电机转矩逐步收敛,最后稳定为恒值或近似为恒值的收敛型非平稳过程,也称为传动系统的启动过程;另一种是电机转矩逐步发散有时甚至导致传动轴断裂的发散型非平稳过程。该非平稳过程又称为自激振荡或失稳振荡。机电耦合振动系统中的第一类非平稳过程持续的时间和振荡的峰值对传动系统的工作状态有重要影响。持续时间长会直接导致电机过热,振荡峰值大则会威胁到传动轴的安全。邱家俊提出并建立了扭振方程与电路方程相耦合的统一数学模型,利用该模型研究了电源电压和扭转刚度对扭振、电磁力矩和电流的影响,最后得出了增加柔性阻尼的减振方法,该种机电耦合系统的传动造成破坏的机会相对较少,因此,研究者对它的研究也很少,主要是对机电耦合振动系统中的第二类非平稳过程即自激振荡或失稳振荡过程的研究。机电传动系统的第二类非平稳过程的研究是从电机系统本身的自激振荡开始的。电机系统本身的机电耦合振动的研究与串联电容补偿技术被广泛应用到高压配电网中有关,因此异步电机的自激振动一直受到关注。

1986 年美国学者 Robert 根据大量的工程经验和试验指出电潜泵轴系启动过程中的振荡,实质上是一种发散型的机电耦合自激振动,他们系统地研究了不同起动方式下电潜泵的机电耦合特性,从工程应用角度提出了避免机电耦合自激振荡的方法。在此工作基础

上, Shadley 提出了在电机转子或负载转子上加上一个阻尼吸振器来避免或减小机电耦合自激振动的办法。这些研究工作将机电耦合振动研究提高到一个新的水平。但是从采用的研究模型上讲, 他们还没有将电机系统和机械传动系统统一起来。Shaltout 研究了大型异步电机起动过程中的扭振过渡过程的扭振行为, 在电机模型基础上加上了负载转子系统这一部分, 客观上构造了机电传动系统的耦合模型。邱家俊以机电耦联动力学为理论基础建立了一个二质体的机电传动系统模型, 分析了电机定、转子电阻和扭转刚度对稳定性的影响。其研究思想的闪光之处在于, 将麦克斯韦的电磁场理论和拉格朗日的分析力学理论结合在一起, 构造了被称为机电耦合动力学的统一理论, 并以该理论为基础解释或分析了一系列非线性振动现象。由于该理论是从系统总能量观点出发研究系统的动态特性, 因而从理论上讲具有考虑问题全面、适合于精确反映各种瞬态过程的优点。还有研究发现当发电机转子受到较严重的电网扰动时, 在不发生失步的条件下, 将产生低频振荡, 对电网输出功率和电网频率及波形产生影响。

关于机电耦合技术的研究工作主要在经典的研究成果的基础上逐步展开, 机电耦合研究一直是一个恒久的话题。21 世纪初, 随着计算机和科学的发展, 对于机电耦合的研究工作者不断的努力, 关于机电耦合的技术获得了巨大的成果。目前, 从机电耦合的角度研究复杂系统的同步特性还处在起步阶段, 许多新概念、新思想才刚刚提出, 关于同步的研究工作主要在经典的同步问题研究成果的基础上逐步展开。20 世纪末, Kocarev 提出了耦合非线性振动器的同步理论。近年来, Mbouna 等人主要研究了关于两机电耦合设备的动力学同步的非线性特性对系统的影响。Gau 提出了具有小振幅的汽缸振荡器中的涡流和热传导增加之间的相互同步问题。另外 Yamapi 等人研究了耦合的 Van der Pol-Duffing 振动系统的同步振动问题。

机电耦合自同步振动机械是一个“简单的”的复杂系统, 以电机驱动的振动机械为例, 它包括激振电机子系统和振动机械机体子系统。由于该系统具有自同步能力, 具有机电耦合特点, 从“复杂系统”的角度看又非常简单。

近年来, 以机电耦合自同步振动机械系统为中心的研究取得了很多丰富的成果。熊万里建立了双振头电振机的机电耦合数学模型, 从定量角度证实了电磁振动机的机电耦合自同步特性。与此同时, 熊万里综合考虑供电电网中串联补偿电容、机械转子系统横振、电机转子与机械转子的旋转运动及相对扭振的影响, 以经典电机理论为基础建立了转子系统的一种综合的机电耦合数学模型。通过对由串联电容和负载波动引起的两种机电耦合非平稳过程的数值研究证实, 机电耦合模型不仅能反映电机系统和机械转子系统固有的动力学特性, 而且能反映电机系统和机械转子系统之间的耦合动力学规律, 适用于研究转子系统的各种非平稳过程。在此基础之上, 用自同步振动系统的机电耦合模型理论解释了系统从不同步到同步, 或是从一种同步状态过渡到另一种同步状态的物理过程。文献根据该振动系统的机电耦合数学模型建立了仿真数学模型, 并通过对几种典型自同步振动过渡过程的机电耦合行为进行了同步特性分析。另外, 还有研究了三电机激振自同步振动系统的机电耦合机理, 在传统的振动机械模型基础上首次给出了其机电耦合模型, 并利用该模型对其过渡过程中的耦合现象做出了合理的解释, 揭示了三电机激振振动筛自同步振动和振动同步的机电耦合机理。张天侠应用非线性振动分析方法建立了自同步振动系统偏心转子耦合运动的微分方程, 给出了耦合参数的数学描述; 基于相空间原理, 分析了系统耦合运动的

非线性特性以及耦合强度对系统运动平衡状态的影响,确定了耦合参数的变化范围;深入研究了偏心转子同步运动的演化过程,导出了系统形成同步运动状态的耦合条件。赵春雨利用系统动力学理论研究具体的双机传动自同步振动系统的动态特性,进而得出动负载与能量传递和同步状态的必要的内在联系和变化规律,揭示了惯性式振动机械平面单质体同向回转的自同步振动的机电耦合机理。

关于机电耦合的概念应用在振动同步理论上的这些研究,大大深化了人们对同步问题的认识,把同步研究推进到一个新的水平。把机电耦合应用在自同步振动系统中,通过该机电耦合动力学模型,可以解决经典的自同步理论中不能解决的问题,为拓广振动同步理论的研究提供了崭新的篇章。

1.4 广义同步理论的发展

广义同步的概念起源于同步概念。同步的定义最早于1673年由惠更斯给出,他针对耦合自激振动系统中的锁频现象,将同步定义为两个系统的相位保持一致的状态。1981年Blekhman将同步定义为“两个相互耦合的过程函数间的某种关系的出现”。1996年期间,Rosenblum称两个耦合系统具有完全相同的响应的状态定义为完全同步(complete synchronization)或一致同步(identical synchronization),并提出用相位同步(phase synchronization)概念来刻画耦合系统的同步状态。同时他还研究了不完全一致的(non-identical)耦合振子之间的同步问题,发现一个振子的响应与一段时间之后的另一个振子的响应完全相同,他给这种同步命名为延迟同步(lag synchronization)。

中国学者闻邦椿在30余年中系统研究总结和归纳了工程中广泛存在的自同步、复合同步和智能控制同步问题的基础上,在1997年从普遍意义上明确提出了广义同步的概念。由此,闻邦椿、熊万里借鉴前人各种定义的思想,将广义同步划分相位同步、延迟同步、分频同步和广义同步四个层次。将自同步更加具体详细的划分并分别定义为:

- (1) 同步双方的相位严格保持相等的相位同步。
- (2) 同步双方的相位保持一个固定相位差的延迟同步。
- (3) 同步双方的频率保持某种确定的比例关系的分频同步。
- (4) 耦合系统的运动状态量之间保持某种与时间无关的确定性关系的广义同步。

以上四个层次的定义中,外延逐步拓广,后一层次依次包含了前面各个层次。这种定义不仅可以描述系统响应与系统激励之间的同步关系,也可以描述系统与系统之间的同步关系。

20世纪末,对于广义同步的研究一直是备受关注的课题。人们在这方面做了大量的工作,采用各种各样的方法实现同步。Rosenblum等人研究了耦合振动系统的转子是怎样实现从相位同步到延迟自同步(phase and lag synchronization)的过渡过程。Pikovsky等人研究了关于相位同步过渡过程。20世纪末至今,Kocarev、Parlitz分别提出了广义同步的概念,且Kocarev研究的是关于耦合动态系统的广义同步问题。Boccaletti、Vincent等人研究了在混沌系统中通过控制能实现部分和非部分(identical and non-identical)同步的概念。

近年来,混沌同步一直是备受关注的课题。人们在这方面做了大量的工作,采用各种各样的方法实现混沌同步,赋予了广义同步新的内涵。其中相当一部分工作讨论的是两个参数相同的非线性系统的完全同步。如果耦合的两个系统不一样,则可能出现广义同步、相位同步和滞后同步。例如,Shahverdiev 提出了在某种冲击系统中具有的混沌广义同步的概念。国内大量的文献已对混沌系统的广义同步问题进行了深程度的研究工作。陶朝海提出了应用线性、非线性和广义同步三种反馈方法,研究了一个新的单参数统一混沌系统的反馈同步问题。这些研究大大深化了人们对同步问题的认识,把同步研究推进到一个新的水平。但是经典的自同步理论中却还有许多问题未得到圆满解决。广义同步的定义赋予了经典同步问题新的内涵,在相位同步、延迟同步、分频同步及广义同步等新概念的指导下,经典同步系统中许多新的物理现象还有待于进一步深入研究。

1.5 展望

随着科学技术的发展,机械系统的同步问题将在工业部门得到愈来愈多广泛的应用。目前,振动同步与控制同步的研究工作,已扩展到振动同步和控制同步的复合系统、多电机驱动的机械系统的控制同步、多液压缸系统和多液压马达的同步控制。研究多机传动机械系统的同步问题将具有广泛的应用前景。

(1) 对于频率接近相同的机械系统,如螺旋桨飞机,由于两个螺旋桨的运动转速和相位不同步,产生拍振,并会发出较大的噪声,对周围工作环境造成污染,因此研究这类机械的速度及相位同步具有重要的实际意义。

(2) 为了消除噪声的环境污染,通过对噪声强度和相位的分析,利用声发生器发出与环境噪声频率、强度和相位适当的声,削减原有的环境噪声,以达到控制噪声的目的。

(3) 由多个电机驱动的大型提升机,如升船机通过刚性连接实现同步,使得机械系统的维修和保养比较复杂,工作量较大。研究多个电机的力矩同步和相位同步系统对于简化驱动系统的结构将具有重要的实际意义。

(4) 研究其他驱动形式,如液压马达等驱动的多机机械系统的同步理论。

(5) 开发复杂系统控制的人工智能系统,将神经网络的学习能力和模糊逻辑控制器可利用专家语言信息的能力结合起来。开发平行工程或交替工作的智能控制系统,以使控制系统更为经济。

(6) 同步理论的研究和应用,可进一步扩展到其他领域,如混沌同步应用于保密系统,基因和转基因的研究也可以应用同步理论与同步原理,并将它直接应用于医疗及生物工程领域。

(7) 直到现在,人们对自然界、人类社会和科学技术的各个领域中的同步现象和同步问题研究的还很不充分。随着科学技术的不断发展,以及工程技术领域对同步理论与技术的需求不断增加,同步理论与技术将有可能逐步发展成为一门具有重要学术价值与重大实际意义的科学技术的一个新分支。

第2章 自同步振动机的同步理论

2.1 概述

在振动机械中,如果恰当安装两个或两个以上的回转式激振电机,即使每两个振动电机之间存在一定的初相位差,在很短的时间内也可以使振动体达到稳定振动的运动状态,这时每两个电机的转速相同,相位差角恒定,即实现了自同步振动。如果相位差角为零恒定值时,自同步振动称为相位自同步;如果相位差为非零恒定值时,自同步振动称为延迟自同步。关于自同步振动的研究,最有代表性的成果是 Blekhman 最早提出的双激振器振动机同步理论,闻邦椿研究了多种振动同步形式,提出了平面运动与空间运动自同步振动机的同步理论、近共振自同步以及振动传动机制近共振自同步和倍频同步,并研究了电机对称安装和质心偏移式的自同步振动机的同步条件和稳定性条件,通过采用 Hamilton 原理的积分平均值的方法,研究了激振器偏移式自同步振动机同步工作条件和稳定性条件。利用该思想,许多学者进行了同步理论的研究,例如两液压缸驱动的振动机之间的同步稳定性问题;求出了针对单质体连杆式振动机的同步理论;对单向振动的惯性式振动机做了研究。近年来,振动同步的研究不断深入和扩展。还有研究者对平面单质体不等偏心距同向回转振动系统进行了运动分析,建立了该系统实现自同步运转和自同步稳定运转的条件,许多文献是单一的对某种振动机同步理论研究,并没有系统地总结和归纳多机驱动的自同步振动机的同步理论。

本章是将多种类型多电机驱动的自同步振动机的同步理论系统地归结起来,该方法拓宽了多机驱动自同步振动机的同步理论的研究思路和研究领域。首先,从四电机驱动的自同步振动机的简化模型出发,详细地推导四电机驱动的自同步振动机的振动力学方程式,从理论上建立了四电机驱动自同步振动机的自同步条件和同步稳定性判据,从而得到了四电机驱动自同步振动机的同步理论,然后,从四电机驱动的自同步振动机的同步理论出发,全面系统地分析出多种类型自同步振动机的同步理论,并得到双电机(对称式和偏移式)和三电机驱动同向、反向回转振动机(包括偏心质量距相等和不等两种类型的振动机)的同步理论。

2.2 四电机驱动自同步振动机的同步理论

2.2.1 四电机驱动自同步振动机振动力学模型分析

四电机驱动的自同步振动机的动力学模型如图 2-1 所示。四电机在图中用四个偏心块

(也称偏心转子)表示,通过偏心转子旋转,从而产生激振力,振动机实现工作。图中所示的 O' 为机体中心, O' 、 O 为其合成质心,而 Oxy 为固定坐标, $O'x'y'$ 为动坐标, O_1 、 O_2 、 O_3 分别为三个激振电机偏心转子的回转中心,并在同一直线上。 $O'O_1=l_1$, $O'O_2=l_2$, $O'O_3=l_3$, $O'O_4=l_4$ 。

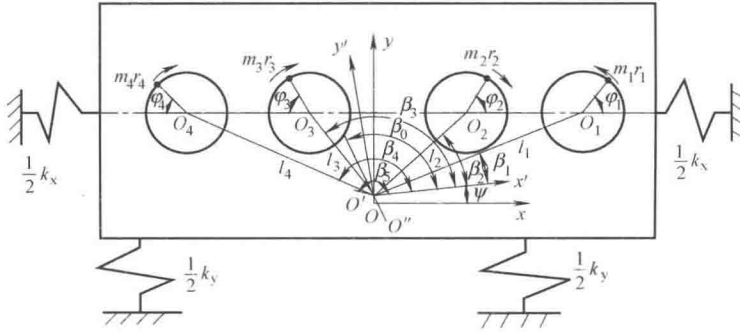


图 2-1 四电机驱动的自同步振动机模型

该振动机的动能 T 和势能 V 分别为:

$$\begin{aligned}
 T = & \frac{1}{2} m_0 \{ [\dot{x} - l_0 \dot{\psi} \sin(\beta_0 + \psi + \pi)]^2 + [\dot{y} + l_0 \dot{\psi} \cos(\beta_0 + \psi + \pi)]^2 \} + \\
 & \frac{1}{2} m_1 \{ [\dot{x} - l_1 \dot{\psi} \sin(\beta_1 + \psi) - r_1 \dot{\varphi}_1 \sin \varphi_1]^2 + [\dot{y} + l_1 \dot{\psi} \cos(\beta_1 + \psi) + r_1 \dot{\varphi}_1 \cos \varphi_1]^2 \} + \\
 & \frac{1}{2} m_3 \{ [\dot{x} - l_3 \dot{\psi} \sin(\beta_3 + \psi) + r_3 \dot{\varphi}_3 \sin \varphi_3]^2 + [\dot{y} + l_3 \dot{\psi} \cos(\beta_3 + \psi) + r_3 \dot{\varphi}_3 \cos \varphi_3]^2 \} + \\
 & \frac{1}{2} m_2 \{ [\dot{x} - l_2 \dot{\psi} \sin(\beta_2 + \psi) + r_2 \dot{\varphi}_2 \sin \varphi_2]^2 + [\dot{y} + l_2 \dot{\psi} \cos(\beta_2 + \psi) + r_2 \dot{\varphi}_2 \cos \varphi_2]^2 \} + \\
 & \frac{1}{2} m_4 \{ [\dot{x} - l_4 \dot{\psi} \sin(\beta_4 + \psi) + r_4 \dot{\varphi}_4 \sin \varphi_4]^2 + [\dot{y} + l_4 \dot{\psi} \cos(\beta_4 + \psi) + r_4 \dot{\varphi}_4 \cos \varphi_4]^2 \} + \\
 & \frac{1}{2} J_0 \dot{\psi}^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 J_i \dot{\varphi}_i^2
 \end{aligned} \tag{2-1}$$

式中, $x, y, \dot{x}, \dot{y}, \ddot{x}, \ddot{y}$ 分别表示水平方向和竖直方向的位移 (m)、速度 (m/s)、加速度 (m/s²); $\psi, \dot{\psi}, \ddot{\psi}$ 分别表示扭摆方向的位移 (rad)、速度 (rad/s)、加速度 (rad/s²); m_0 为振动体的质量 (kg); m_i ($i=1, 2, 3, 4$) 分别为四个偏心块的质量 (kg); r_i ($i=1, 2, 3, 4$) 分别为四个偏心块的半径 (m); φ_i ($i=1, 2, 3, 4$) 分别为四个偏心块的角位移 (rad); J_0 表示偏心块的转动惯量 (kg·m²); $\dot{\varphi}_i$ ($i=1, 2, 3, 4$) 分别表示四个偏心块相应方向的角速度 (rad/s); $\ddot{\varphi}_i$ ($i=1, 2, 3, 4$) 分别表示四个偏心块相应方向的角加速度 (rad/s²)。

$$V = \frac{1}{2} k_x x^2 + \frac{1}{2} k_y y^2 + \frac{1}{2} k_\psi \psi^2 \tag{2-2}$$

式中, k_x, k_y, k_ψ 分别表示为 x 方向、 y 方向和 ψ 方向的刚度, 单位分别为 N/m、N/m、N·m/rad。能量散失函数为:

$$C = \frac{1}{2}c_x \dot{x}^2 + \frac{1}{2}c_y \dot{y}^2 + \frac{1}{2}c_\psi \dot{\psi}^2 - \frac{1}{2}c_1(\dot{\varphi}_1 - \dot{\psi})^2 + \frac{1}{2}c_3(\dot{\varphi}_3 + \dot{\psi})^2 + \frac{1}{2}c_2(\dot{\varphi}_2 + \dot{\psi})^2 + \frac{1}{2}c_4(\dot{\varphi}_4 + \dot{\psi})^2 \quad (2-3)$$

式中, c_x 、 c_y 、 c_ψ 分别表示为 x 方向、 y 方向和 ψ 方向的阻尼, 单位分别为 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}$ 、 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}$ 、 $\text{Nm} \cdot \text{s}/\text{rad}$; $c_i (i=1, 2, \dots, 4)$ 分别表示电机 i 转轴的阻尼 ($\text{Nm} \cdot \text{s}/\text{rad}$)。

利用拉格朗日方程建立振动方程式, 得到振动体三个方向上的运动方程和四电机的偏心转子的回转运动方程为:

$$\begin{aligned} M\ddot{x} + c_x\dot{x} + k_x x &= m_1 r_1 (\ddot{\varphi}_1 \sin\varphi_1 + \dot{\varphi}_1^2 \cos\varphi_1) - m_3 r_3 (\ddot{\varphi}_3 \sin\varphi_3 + \dot{\varphi}_3^2 \cos\varphi_3) - \\ & m_2 r_2 (\ddot{\varphi}_2 \sin\varphi_2 + \dot{\varphi}_2^2 \cos\varphi_2) - m_4 r_4 (\ddot{\varphi}_4 \sin\varphi_4 + \dot{\varphi}_4^2 \cos\varphi_4) \\ M\ddot{y} + c_y\dot{y} + k_y y &= m_1 r_1 (-\ddot{\varphi}_1 \cos\varphi_1 + \dot{\varphi}_1^2 \sin\varphi_1) - m_3 r_3 (-\ddot{\varphi}_3 \cos\varphi_3 + \dot{\varphi}_3^2 \sin\varphi_3) - \\ & m_2 r_2 (-\ddot{\varphi}_2 \cos\varphi_2 + \dot{\varphi}_2^2 \sin\varphi_2) - m_4 r_4 (-\ddot{\varphi}_4 \cos\varphi_4 + \dot{\varphi}_4^2 \sin\varphi_4) \\ J\ddot{\psi} + c_\psi\dot{\psi} + k_\psi\psi &= c_1(\dot{\varphi}_1 - \dot{\psi}) - c_3(\dot{\varphi}_3 + \dot{\psi}) - c_2(\dot{\varphi}_2 + \dot{\psi}) - c_4(\dot{\varphi}_4 + \dot{\psi}) + \\ & m_1 l_1 r_1 [-\ddot{\varphi}_1 \cos(\varphi_1 - \beta_1 - \psi) + \dot{\varphi}_1^2 \sin(\varphi_1 - \beta_1 - \psi)] + \\ & m_3 l_3 r_3 [-\ddot{\varphi}_3 \cos(\varphi_3 + \beta_3 + \psi) + \dot{\varphi}_3^2 \sin(\varphi_3 + \beta_3 + \psi)] + \\ & m_2 l_2 r_2 [-\ddot{\varphi}_2 \cos(\varphi_2 + \beta_2 + \psi) + \dot{\varphi}_2^2 \sin(\varphi_2 + \beta_2 + \psi)] + \\ & m_4 l_4 r_4 [-\ddot{\varphi}_4 \cos(\varphi_4 + \beta_4 + \psi) + \dot{\varphi}_4^2 \sin(\varphi_4 + \beta_4 + \psi)] \\ J_{0j}\ddot{\varphi}_j &= M_{gj} - M_{lj} - c_j(\dot{\varphi}_j - \dot{\psi}) + m_j r_j [\ddot{x} \sin\varphi_j - \ddot{y} \cos\varphi_j] + \\ & m_j l_j r_j [-\ddot{\psi} \cos(\varphi_j - \beta_j - \psi) - \dot{\psi}^2 \sin(\varphi_j - \beta_j - \psi)] \quad j=1 \\ J_{0i}\ddot{\varphi}_i &= M_{gi} - M_{fi} - c_i(\dot{\varphi}_i + \dot{\psi}) - m_i r_i [\ddot{x} \sin\varphi_i + \ddot{y} \cos\varphi_i] + \\ & m_i l_i r_i [-\ddot{\psi} \cos(\varphi_i + \beta_i + \psi) + \dot{\psi}^2 \sin(\varphi_i + \beta_i + \psi)] \quad i=2, 3, 4 \end{aligned} \quad (2-4)$$

式中, $M = m_0 + \sum_{i=1}^4 m_i$ 为振动机 (包括电机及偏心块) 总质量 (kg); $l_0 = O'O'$ 为合成质心与机体质心之距 (m); l_i 为 O_i 与 O' 之距 (m); $J = J_0 + m_0 l_0^2 + \sum_{i=1}^4 m_i l_i^2$ 为机体绕 O 点的 (包括电机及偏心块) 转动惯量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$); $J_{0i} = J_i + m_i r_i^2 (i=1, 2, 3, 4)$ 为偏心块 i 绕 O_i 点的转动惯量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$); M_{gj} 、 $M_{gi} (j=1; i=2, 3, 4)$ 分别为电机轴上的电磁转矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$); M_{lj} 、 $M_{fi} (j=1; i=2, 3, 4)$ 分别为电机轴上的负载转矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$)。

考虑稳态运动情况, 忽略小阻尼影响中的若干高阶小量, 求解式 (2-4) 振动体稳态解。

$$\text{令 } \varphi_1 = \omega t + \frac{1}{2}\alpha_{12}, \varphi_2 = \omega t - \frac{1}{2}\alpha_{12}, \varphi_3 = \omega t - \frac{1}{2}\alpha_{12} + \alpha_{23}, \varphi_4 = \omega t - \frac{1}{2}\alpha_{12} + \alpha_{23} - \alpha_{34},$$

其中, ω 为四激振电机轴的角速度 (rad/s)。 α_{12} 、 α_{23} 、 α_{34} 分别为偏心块 1 和 2、3 和 2 及 3 和 4 之间的相位差角 (rad)。从而得到 $\varphi_1 - \varphi_2 = \alpha_{12}$, $\varphi_2 - \varphi_3 = -\alpha_{23}$, $\varphi_3 - \varphi_4 = \alpha_{34}$ 。将