



“十二五”国家重点图书出版规划项目

连杆机构弹性振动 理论研究

Lianganjigou Tanxingzhendong Lilunyanjiu

»»» 蔡敢为 李兆军 王汝贵 著



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

图书在版编目(CIP)数据

连杆机构弹性振动理论研究/蔡敢为 李兆军 王汝贵 著. —武汉: 华中科技大学出版社, 2012. 2

ISBN 978-7-5609-7827-7

I. 连… II. ①蔡… ②李… ③王… III. 连杆机构-弹性振动-理论研究 IV. TH112.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 055439 号

连杆机构弹性振动理论研究

蔡敢为 李兆军 王汝贵 著

策划编辑: 万亚军

责任编辑: 姚同梅

封面设计: 范翠璇

责任校对: 朱霞

责任监印: 张正林

出版发行: 华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编: 430074 电话: (027)87557437

录 排: 华中科技大学惠友文印中心

印 刷: 湖北新华印务有限公司

开 本: 710mm×1000mm 1/16

印 张: 10.25 插页: 1

字 数: 215 千字

版 次: 2012 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 38.00 元



本书若有印装质量问题, 请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线: 400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

内 容 介 绍

弹性连杆机构的振动对其工作精度、疲劳寿命等都有重要影响。随着连杆机构向高精度、高速度、小质量、高负荷方向发展,其弹性振动的特性也就愈显重要。本书主要介绍作者在连杆机构弹性振动方面的研究工作,涉及含复合材料构件的机构振动和在机电耦合作用下的机构非线性振动两个方面内容。

纤维复合材料的刚重比、强重比和阻尼减振特性都显著高于传统金属材料,在连杆机构中采用纤维复合材料构件是抑制其弹性振动的一条有效措施。但纤维复合材料是各向异性材料,其弹性常数等有别于金属材料,其构件的刚度与阻尼特性也不同于金属材料构件。含复合材料构件的连杆机构的振动方程及其相应计算等都与金属材料构件的连杆机构有很大区别。本书介绍了如何建立含叠层复合材料构件、三维编织复合材料构件的连杆机构的振动方程,以及复合材料的细观力学参数与连杆机构宏观动态性能之间的关系等内容。

连杆机构的运行与研究表明,电动机的电磁参数对机构的动态性能有重要影响,如:驱动电动机的电磁谐波有时会引起连杆机构产生强烈振动;系统的临界转速会随电动机的运行参数变化而变化;在一定条件下,系统将出现参数共振与强迫振动相耦合的振动;等等。因此,把驱动电动机与连杆机构集成研究是有必要的。本书介绍了如何建立反映驱动电动机机电耦合关系的有限元单元及通过此种单元建立电动机-连杆机构系统的有限元动态分析方程,并讨论了此类系统在各种激励作用下的非线性振动特点、运动稳定性等。

本书分为五章。第1章为绪论。第2章介绍由连杆机构与驱动电动机组成的系统的弹性振动方程。连杆机构包括金属材料构件的连杆机构、含对称叠层复合材料构件的连杆机构、含三维编织纤维复合材料构件的连杆机构。电动机包括三相交流电动机、直流电动机、伺服电动机。系统包括电动机-四杆机构系统和电动机-两自由度五杆机构系统。第3章分析电动机-连杆机构系统的非线性振动,包括系统的自激惯性力、系统的参激振动机理、参激振动的耦合、非线性共振分析。第4章为系统的运动稳定性分析,包括主共振的运动稳定性、次谐共振的运动稳定性、超谐共振的运动稳定性、组合共振的运动稳定性、多重共振的运动稳定性分析等。第5章介绍机构弹性振动响应的仿真计算,包括迭代式模态叠加多尺度法的求解过程、多尺度-Newmark法的求解过程和实例分析。

本书既可作为科研与工程技术人员参考书,也可作为相关专业研究生的教材。

序

随着机器的运行速度不断提高,载荷逐步加大,机器运行中其弹性构件的振动对其运动精度、疲劳寿命等的影响越来越显著。对机器弹性构件振动特性的深入研究,是机器设计的重要内容,对提高机器动态性能具有重要的作用。

蔡敢为教授及其团队十多年来对连杆机构的弹性振动性能进行了深入系统的研究,特别是对含复合材料构件的连杆机构振动特性、考虑驱动电动机与连杆机构的机电耦合作用的连杆机构系统的动态特性等开展了很有成效的研究工作。

采用复合材料替代金属来制造连杆机构的构件,是保证机构在高速下的运动精度和抑制其有害振动的一种有效措施。复合材料的比强度、比刚度大,阻尼特性等也明显优于金属材料,有利于改善机构的振动特性。特别是三维编织复合材料,因为其三维编织的纤维结构克服了叠层复合材料层间强度过低的缺陷,整体性能很好,有广泛的应用前景,也适用于连杆机构、机器人机构等。但至今未见系统介绍含复合材料构件的机构动力学分析与动态设计方面的专著,本书则填补了这一空白。本书详细地介绍了含叠层复合材料构件、三维编织复合材料构件的连杆机构的弹性振动的建模方法,并全面地分析了其动态特性,对相关的教学与科研人员来说有很大的参考价值。

机电系统的运行与有关研究表明,电动机的电磁参数对机构的动态性能有重要影响。将电动机和弹性连杆机构作为一个系统的动态特性分析,称为“完全动力分析”。此前这方面的研究工作做得非常简单,甚至还没有建立包含电动机和机构的系统分析模型,更未见深入系统介绍这方面研究的专著。建立具有不同领域的物理量的系统动态方程不是一件容易的事情。本书创造性地提出了反映机电耦合关系的有限元电动机单元,然后应用此有限元法建立了包含系统机械参数和电磁参数的解析形式的振动方程。在此基础上,对系统在电动机转子振动偏心时不均匀气隙的气隙磁场导致的电磁参数激励、系统自激惯性力产生的激励等共同作用下的振动特性展开了全面、系统的研究,在系统各种非线性共振及其稳定性等方面获得许多深刻认识,并总结出一些规律,这些研究成果对电动机-连杆机构系统的设计有很高的参考价值,甚至对其他机电系统的机电耦合特性研究,也有较高的参考价值。

至今,在连杆机构弹性振动研究中,“运动弹性动力学”(kineto-elastodynamics, KED)仍然是最主要的和被广泛采用的分析方法。本书较好地充实了 KED 的内容,对其发展有积极推动作用。我很乐意为本书作序,我相信本书的出版必将对连杆机构的进一步发展和应用有所促进!

中国科学院院士



2011. 11. 18.

前 言

当连杆机构中一个及一个以上构件为弹性件时,该连杆机构称为弹性连杆机构。连杆机构中弹性构件的振动可简称为连杆机构弹性振动。弹性构件的振动对连杆机构工作精度、疲劳寿命等都有重要影响。在科学技术的发展、市场竞争的刺激以及人们不断追求完美等因素的作用下,连杆机构向高精度、高速度、小质量、高负荷方面不断发展,而其振动性能也愈发得到重视。本书主要介绍含新型纤维复合材料构件的连杆机构的振动性能、连杆机构在机电耦合作用下的非线性振动性能两个方面的内容。

机械学的发展与新材料的发明和应用有着紧密的联系,研究新材料在机械中的应用是当今机械学的一个重要内容。在机械系统中应用强重比和阻尼特性显著优于传统金属材料的先进复合材料是改善其弹性动力学性能的一条有效途径,是使机械产品在运转速度、质量、能量消耗和动态精度等方面的市场竞争能力产生本质飞跃的有力手段。新型的三维编织纤维增强复合材料克服了二维层合板复合材料层间刚度、强度过低的缺陷,显著地提高了材料的整体强度,且具有良好的阻尼性能,是作为高速连杆机构中构件的理想材料。

1993年秋天至1998年春天,我在华中科技大学完成博士学位论文期间,在导师廖道训教授指导下完成了他主持的国家自然科学基金项目——具有三维纤维复合材料构件的机构动力学研究(项目编号:59475029)。我们提出了三维正交复合材料弹性常数、三维编织纤维复合材料杆件的刚度和阻尼等的计算公式;对含三维编织复合材料构件的连杆机构的振动方程进行了详细研究,将三维整体编织的复合材料视为多个单向纤维复合材料的叠加,由三维应变转换矩阵得到应变分布与结点位移间的关系,从而导出有限元单元刚度矩阵;分析了各向异性材料构件在不同振型中具有不同阻尼的原因,即不同应变所耗散的能量不同,而在不同的振型中各种应变所占比重不同,应变的不同组合就使得构件在不同的振型中具有不同阻尼,据此,由振动时各单向纤维复合材料的6个应变耗散能量集合组成单元的能量耗散,从而得到了各比阻尼容量的计算式,通过复合材料的阻尼单元模型及耗散能量表达式导出了机构的阻尼矩阵,在此基础上建立了含三维编织复合材料杆件的连杆机构的振动方程,并详细分析了这类连杆机构的振动性能与材料参数等之间的内在关系。

1998年秋至2000年底,我在中南大学钟掘院士指导下做博士后研究,完成了中国博士后科学基金项目——具有复合材料构件的机构动态设计理论,对含复合材料构件的连杆机构弹性振动做了进一步的研究。但在此期间,我的主要精力放在参与完成钟院士主持的国家自然科学基金重点项目——复杂机电系统耦合与解耦设计理



论与方法(项目编号:59835170)上,主要担任系统的全局耦合模型和机电耦合关系等的研究工作。虽然该项目是结合轧钢机等冶金机械展开的,但建立具有不同物理量的系统全局耦合动态分析模型的工作,特别是关于机电耦合关系的研究,引起了我研究驱动电动机机电耦合关系对连杆机构非线性振动特性的影响的兴趣。

高速机构在运行中时常表现出一些人们未曾料及的现象,甚至出现严重的故障,如:驱动电动机的电磁谐波有时会引起高速轻型机构产生强烈振动;系统的临界转速会随电动机的运行参数变化而变化;在一定条件下,系统会出现参数共振与强迫振动相耦合的振动,等等。2001年初,我博士后出站后回到华中科技大学工作,于2001年申报了国家自然科学基金项目——含复合材料构件的机构系统耦合动力学研究(项目编号:50175031)并获批准。2003年我调到广西大学工作,又申请并获得了有关多自由度可控连杆机构系统的耦合动力学研究的教育部科技重点项目和广西自然科学基金项目。李兆军博士、王汝贵博士在攻读博士学位期间参与了我主持的这几个项目,是这几个项目主要的完成人。硕士生王文龙、戴文正、张晓斌、王湘、常平平、潘德永、余振延等也完成了许多工作。在这些项目中,我和研究团队对含复合材料的连杆机构振动问题做了进一步研究,包括针对过去 Tompson 教授等人所建立振动方程的不足,根据复合材料细观力学等理论重新推导并建立了含叠层复合材料构件的连杆机构的振动方程,我们所建立的机构振动方程反映了叠层复合材料各部分性能参数与机构宏观动态性能的关系,其中机构阻尼反映了叠层复合材料各部分能量耗散特性。这些项目的研究重点是驱动电动机机电耦合作用对连杆机构振动特性的影响。我们以驱动电动机-连杆机构系统为研究对象,对这类系统的运动稳定性、准静态响应、临界转速等进行了系统研究。针对驱动电动机转子振动偏心时不均匀气隙的气隙磁场,分析其实际运行状态的机电耦合关系,并建立了以电动机转子横振、扭振为节点位移的电动机有限元单元;应用有限单元法建立了含驱动电动机电磁参数、复合材料参数和机构的结构参数的系统非线性耦合动力学模型;分析了系统存在电磁参数振动和强迫振动的机理,研究了系统在电磁参数激励和外激励同时作用下的内共振、主共振、组合共振、次谐共振、超谐共振及多重共振响应及其运动稳定性等非线性振动特性,系统的共振响应、运动稳定性及临界转速与系统的结构参数、复合材料参数、电磁参数之间的内在关系;等等。在研究中,采用了以构件的振动响应为目标函数,以复合材料的纤维结构参数、电磁参数及复合材料构件截面的几何尺寸为设计变量的优化设计方法。

我们前期针对连杆机构振动特性的研究成果也对我们后来对其他机电系统振动特性的研究起到了较好的参考作用。如我们所完成的反映机电耦合关系的电动机有限元单元、系统的有限元动态分析模型、机电系统的非线性振动分析等研究成果,对我后来申报并获批的国家自然科学基金项目“混流式水轮发电机组全局耦合动态性能研究”(项目编号:50565501)的研究工作就起到了较好的借鉴作用。

然而,从国内外的研究情况看,含复合材料构件的连杆机构振动性能、连杆机构

在机电耦合作用下的振动性能等研究内容还没有得到学术界的足够重视,这些方面的研究对提高连杆机构动态性能的巨大潜力也还没有充分发挥出来。考虑至今尚未见到介绍这方面内容的学术专著,本着抛砖引玉的愿望,我们将这些年关于弹性连杆机构振动理论的研究成果组织起来形成本书,希望本书对相关科研工作及研究生培养起到一定参考作用。也希望本书能够引起更多的研究者关注并参与研究应用复合材料的连杆机构的振动性能和机电耦合作用对连杆机构振动特性的影响。更希望今后这方面的研究成果能够在工程实际中得到广泛采用,促使工程中的连杆机构的动态性能得到显著提高。

华中科技大学出版社王连弟副社长及万亚军编辑、刘锦编辑等对本书的出版给予了大力支持,并帮助我们成功申报了“‘十二五’国家重点图书出版规划项目”(已入选),在此对他们表示衷心的感谢。

考虑学术专著的特色,希望本书主要反映我们在连杆机构弹性振动方面的研究成果,已尽量少引用其他文献。但还是因为知识的连贯性和读者的需要等原因,不得不引用一些文献,最为突出的表现在本书的第2章第2节关于金属材料杆件的有限元单元模型的介绍中。另外,从本书结构考虑,又没有将我们近年来在连杆机构弹性振动方面的一些研究成果写入本书,如有关三向正交纤维复合材料的弹性常数、三维正交纤维复合材料弹性性能细观力学分析、三维编织复合材料杆件的刚度与阻尼等内容,都是含复合材料构件的机构弹性振动的重要研究内容,但从章节编排等方面考虑,没有纳入本书正文部分,而是作为本书的参考文献提供给需要的读者。

我在完成博士学位论文期间和博士后研究工作中分别得到廖道训教授和钟掘院士的悉心指导,他们的学术思想和研究艺术对我日后的科研工作具有深远影响。在本书完成之际,谨向两位尊敬的导师表示衷心感谢。

本人及团队的研究工作还得到赵淳生院士的亲切关怀和指教、帮助,赵院士还在百忙之中抽时间为本书作序,在此谨对尊敬的赵院士表示衷心感谢。

本书的内容反映了本人及所指导的研究生近期在机构动力学方面的研究成果,这些成果是在两个国家自然科学基金(项目编号:59475029,50175031)及中国博士后科学基金、湖南省自然科学基金、教育部科技重点项目基金和广西自然科学基金等的资助下取得的,在此谨向国家自然科学基金委员会和其他资助部门表示衷心的感谢。

在完成本书涉及的一系列科研项目的过程中,我们参考了大量国内外文献,在此对这些文献的作者表示衷心的感谢。

本人指导的多位博士研究生和硕士研究生为本书的研究工作作出了重要贡献,在此也要衷心地感谢他们。

由于学力浅薄、治学不精,我们对连杆机构弹性振动的研究还很不完善,尤其对多自由度连杆机构的振动研究更需进一步深入。另外,本人在1998年到中南大学做博士后研究工作后,主要精力转入了冶金机械的动态性能研究,2003年调入广西大学工作后又转入水轮发电动机组的动态性能研究,此后又相继研究工程机械、工业机



器人、变胞机构、振动时效技术等,因此这些年未能持续地把精力集中于连杆机构的弹性振动研究上,对该领域的国内外研究动态也难以很好地掌握,所以书中疏漏、不妥甚至是错误之处在所难免,恳请读者不吝赐教。

蔡敢为

2011 年 11 月

主要符号表

u_1 :三相交流电动机单元的广义坐标向量	对速度向量
$W_{1y}(x, t)$:三相交流电动机轴的轴线上任一点沿 y 方向的弹性横向位移	$\overline{m}_1$:三相交流电动机单元的质量矩阵
$W_{1z}(x, t)$:三相交流电动机轴的轴线上任一点沿 z 方向的弹性横向位移	N_{11} :三相交流电动机单元的弹性势能
$V_1(x, t)$:三相交流电动机轴的轴线上任一点的弹性扭角	E_1 :三相交流电动机轴材料的弹性模量
$\phi_1(x), \phi_2(x), \phi_3(x), \phi_4(x)$:三相交流电动机单元的类型函数	$I_1(x)$:三相交流电动机轴抗弯截面惯性矩分布函数
T_{E1} :三相交流电动机单元的动能	G_1 :电动机轴材料的剪切弹性模量
l_1 :三相交流电动机轴长度	$J_{01}(x)$:三相交流电动机轴极惯性矩分布函数
$m_1(x)$:三相交流电动机轴的质量分布函数	δ :三相交流电动机气隙长度
ρ_1 :三相交流电动机轴的材料密度	e :三相交流电动机转子的气隙偏心
A_1 :三相交流电动机轴的横截面积	e_0 :三相交流电动机转子的转动偏心
m_{10} :三相交流电动机转子的质量	φ_1 :三相交流电动机轴的转角
$J_1(x)$:三相交流电动机轴的转动惯量分布函数	R_1 :三相交流电动机定子内圆半径
J_{10} :三相交流电动机转子的转动惯量	L_{01} :三相交流电动机转子的有效长度
$\dot{W}_{1ya}(x, t)$:三相交流电动机轴的轴线上坐标为 x 的任一点沿 y 方向的横向绝对速度	ϵ_1 :三相交流电动机有效相对偏心
$\dot{W}_{1za}(x, t)$:三相交流电动机轴的轴线上坐标为 x 的任一点沿 z 方向的横向绝对速度	δ_0 :三相交流电动机均匀气隙长度
$\dot{V}_{1a}(x, t)$:三相交流电动机轴上距离原点为 x 的任意横截面的绝对角速度	k_μ :三相交流电动机气隙饱和度
$\dot{u}_{1a}$:三相交流电动机单元节点的绝对速度向量	k_1 :三相交流电动机平均气隙的计算气隙系数
	δ_{Fe} :三相交流电动机磁铁材料当量气隙长度
	Δ_0 :三相交流电动机均匀气隙磁导
	μ_0 :空气磁导率
	s :三相交流电动机转差率
	ω_0 :三相交流电动机的同步转速
	f :供电电源频率



p :三相交流电动机合成磁场磁极对数

ϕ :三相交流转子电流滞后定子电流的相位角

F_{1m} :三相交流定子三相合成磁通势的幅值

F_{2m} :三相交流转子三相合成磁通势的幅值

α :径向气隙与 y 轴的夹角

N_{12} :三相交流电动机气隙磁场能

N_1 :三相交流电动机单元的总势能

$\bar{k}_1$:三相交流电动机单元与弹性势能 N_{11} 相关的刚度矩阵

$\bar{k}_{01}$:三相交流电动机单元与电动机气隙磁场能 N_{12} 相关的刚度矩阵

u_1 :三相交流电动机单元广义坐标向量

$\bar{E}_0$:与三相交流电动机转子转动偏心相关的向量

Ω_0 :三相交流电磁参数激励频率

$\bar{c}_1$:三相交流电动机单元的阻尼矩阵

$\bar{f}_1$:三相交流电动机单元外加载荷的广义力列阵

$\bar{q}_1$:与三相交流电动机单元相连接的其他单元给予该单元的作用力列阵

$\ddot{u}_{1r}$:三相交流电动机单元的刚体加速度列阵

u_5 :伺服电动机单元广义坐标向量

$W_5(x, t)$:伺服电动机轴的轴线上任一点的横向位移

$V_5(x, t)$:伺服电动机轴的轴线上任一点的弹性扭角

$\chi_1(x), \chi_2(x), \chi_3(x), \chi_4(x)$:伺服电动机单元型函数

T_{E5} :伺服电动机单元动能

l :伺服电动机轴长度

$m_5(x)$:伺服电动机轴的质量分布函数

m_{50} :伺服电动机转子质量

$J_5(x)$:伺服电动机轴的转动惯量分布函数

J_{50} :伺服电动机转子转动惯量

$\dot{u}_5$:伺服电动机单元节点的绝对速度向量

$\bar{m}_5$:伺服电动机单元的质量矩阵

E_5 :伺服电动机轴材料的弹性模量

G_5 :伺服电动机轴材料的剪切弹性模量

$I_5(x)$:伺服电动机轴抗弯截面惯性矩分布函数

$J_5(x)$:伺服电动机轴极惯性矩分布函数

m_1 :伺服电动机定子相数

m_2 :伺服电动机转子相数

x_m :伺服电动机激磁电抗

r'_2 :伺服电动机转子绕组的电阻归算值

x'_2 :伺服电动机转子绕组的等效自感电抗的归算值

R_s :伺服电动机定子内圆半径

l_s :伺服电动机转子的有效长度

Δ_s :伺服电动机均匀气隙磁导

δ_s :伺服电动机均匀气隙长度

$k_{\mu s}$:伺服电动机气隙饱和度

k_{1s} :平均气隙的计算气隙系数

δ_{Fe_s} :伺服电动机铁磁材料当量气隙长度

ϵ :伺服电动机有效相对偏心

ω_s :伺服电动机的同步转速

p_s :伺服电动机合成磁场磁极对数

φ_{s1} :伺服电动机转子正序电流滞后

于定子正序电流的相位角

φ_{s2} : 伺服电动机转子逆序电流滞后于定子逆序电流的相位角

F_{+s} : 伺服电动机定子绕组正序旋转时磁势的幅值

F_{-s} : 伺服电动机定子绕组负序旋转时磁势的幅值

F_{+r} : 伺服电动机转子绕组正序旋转时磁势的幅值

F_{-r} : 伺服电动机转子绕组负序旋转时磁势的幅值

ω_s : 伺服电动机的同步转速

s_s : 伺服电动机转动滑差率

N_5 : 伺服电动机单元总势能

N_{51} : 伺服电动机单元弹性势能

N_{52} : 伺服电动机单元气隙磁场能

$\bar{k}_{51}$: 与伺服电动机转子材料参数有关的电动机单元的刚度矩阵

$\bar{k}_{52}$: 与伺服电动机转子电磁参数有关的电动机单元的刚度矩阵

$\bar{k}_{05}$: 与伺服电动机转子静偏心、振动偏心和转动偏心有关的四阶向量

T_{E5} : 直流电动机单元的动能

$m_6(x)$: 直流电动机轴的质量分布函数

$J_6(x)$: 直流电动机轴的转动惯量分布函数

$W_6(x, t), V_6(x, t)$: 直流电动机轴的轴线上任一点的横向位移和弹性扭角

F_s : 直流电动机气隙磁势

F_f : 直流电动机励磁磁势

F_a : 直流电动机电枢磁势

F_{im} : 直流电动机每一极上的励磁磁势幅值

F_{am} : 直流电动机每一极上的电枢磁势的幅值

N_f : 直流电动机每一磁极上励磁绕组的总匝数

I_f : 直流电动机直流励磁电流

S : 直流电动机电枢表面的总元件(导体)数

p_d : 直流电动机极对数

N_y : 直流电动机元件的匝数

i_a : 直流电动机元件电流

N_{61} : 直流电动机单元的弹性势能

N_{62} : 直流电动机单元的气隙磁场能

N_6 : 直流电动机单元的总势能

R_d : 直流电动机定子内圆半径

l_d : 转子的有效长度

Δ_d : 直流电动机均匀气隙磁导

δ_d : 直流电动机均匀气隙长度

$k_{\mu d}$: 直流电动机气隙饱和度

k_{1d} : 直流电动机平均气隙的计算气隙系数

δ_{Fed} : 直流电动机铁磁材料当量气隙

$\bar{k}_{61}$: 与直流电动机转子材料参数有关的电动机单元的刚度矩阵

$\bar{k}_{62}$: 与直流电动机转子电磁参数有关的电动机单元的刚度矩阵

$\bar{k}_{06}$: 与直流电动机转子静偏心、振动偏心和转动偏心有关的 4 阶向量

E_6 : 直流电动机轴材料的弹性模量

G_6 : 直流电动机轴材料的剪切弹性模量

$I_6(x)$: 直流电动机轴抗弯截面惯性矩分布函数

$J_6(x)$: 直流电动机轴极惯性矩分布函数

$W_2(\bar{x}, t)$: 金属材料梁单元中性层中轴线上任一点的弹性横向位移

$V_2(\bar{x}, t)$: 金属材料梁单元中性层中轴线上任一点的弹性纵向位移



$\phi_5(\bar{x}), \phi_6(\bar{x}), \dots, \phi_{12}(\bar{x})$: 金属材料梁单元型函数

u_2 : 金属材料梁单元的广义坐标向量

T_{E2} : 金属材料梁单元的动能

l_2 : 金属材料梁单元长度

$m_2(\bar{x})$: 金属材料梁单元的质量分布函数

ρ_2 : 金属材料梁单元材料密度

A_2 : 金属材料梁单元横截面积

$\dot{W}_{2a}(\bar{x}, t)$: 金属材料梁单元任意截面处的横向绝对速度

$\dot{V}_{2a}(\bar{x}, t)$: 金属材料梁单元任意截面处的轴向绝对速度

$\dot{u}_{2a}$: 金属材料梁单元节点的绝对速度向量

$\bar{m}_2$: 金属材料梁单元的质量矩阵

N_2 : 金属材料梁单元的应变能

Ω : 梁单元体积

ε_2 : 金属材料梁单元在局部坐标系中的应变向量

σ_2 : 金属材料梁单元在局部坐标系中的应力向量

E_2 : 金属材料梁单元材料的弹性模量

I_2 : 金属材料梁单元抗弯截面惯性矩

$\bar{k}_2$: 金属材料梁单元的刚度矩阵

$\bar{c}_2$: 金属材料梁单元的阻尼矩阵

$\bar{f}_2$: 金属材料外加载荷的广义力列阵

$\bar{q}_2$: 与梁单元相连接的其他单元给予该单元的作用力列阵

$\ddot{u}_{2r}$: 金属材料梁单元的刚度加速度列阵

$W_3(\bar{x}, t)$: 三维编织复合材料梁单元中性层中轴线上任一点的弹性横向位移

$V_3(\bar{x}, t)$: 三维编织复合材料梁单元

中性层中轴线上任一点的弹性纵向位移

$\phi_{13}(\bar{x}), \phi_{14}(\bar{x}), \dots, \phi_{20}(\bar{x})$: 三维编织复合材料梁单元型函数

u_3 : 三维编织复合材料梁单元的广义坐标向量

T_{E3} : 三维编织复合材料梁单元的动能

l_3 : 三维编织复合材料梁单元长度

$m_3(\bar{x})$: 三维编织复合材料梁单元的质量分布函数

ρ_3 : 三维编织复合材料梁单元材料的平均密度

ρ_{3f} : 三维编织复合材料纤维的密度

ρ_{3m} : 三维编织复合材料基体的密度

v_{3f} : 三维编织复合材料纤维的体积百分比

v_{3m} : 三维编织复合材料基体的体积百分比

A_3 : 三维编织复合材料梁单元的横截面积

$\dot{W}_{3a}(\bar{x}, t)$: 三维编织复合材料梁单元任意截面处的横向绝对速度

$\dot{V}_{3a}(\bar{x}, t)$: 三维编织复合材料梁单元任意截面处的轴向绝对速度

$\dot{u}_{3a}$: 三维编织复合材料梁单元节点的绝对速度向量

$\bar{m}_3$: 三维编织复合材料梁单元的质量矩阵

N_3 : 三维编织复合材料梁单元的应变能

ε_3 : 三维编织复合材料梁单元在局部坐标系中的应变向量

σ_3 : 三维编织复合材料梁单元在局部坐标系中的应力向量

N_{3j} : 三维编织复合材料梁单元第 j

部分的应变能

Ω_j : 四分之一三维编织复合材料梁单元体积

ε_{3j} : 三维编织复合材料梁单元第 j 部分在其正轴坐标系 $Ox'y'z'$ 中的应变向量

σ_{3j} : 三维编织复合材料梁单元第 j 部分在其正轴坐标系 $Ox'y'z'$ 中的应力向量

C_{3j} : 三维编织复合材料梁单元第 j 部分在其正轴坐标系 $Ox'y'z'$ 中的本构关系矩阵

L_{3j} : 三维编织复合材料梁单元第 j 部分在梁单元局部坐标系中的应变转换矩阵

$\bar{k}_{3j}$: 三维编织复合材料梁单元第 j 部分的刚度矩阵

$\bar{k}_3$: 三维编织复合材料梁单元的刚度矩阵

$\bar{c}_3$: 三维编织复合材料梁单元的阻尼矩阵

$\bar{f}_3$: 三维编织复合材料梁单元外加载荷的广义力列阵

$\bar{q}_3$: 与三维编织复合材料梁单元相连的其他单元给予该单元的作用力列阵

$\ddot{u}_{3r}$: 三维编织复合材料梁单元的刚度加速度列阵

u_4 : 对称叠层复合材料梁单元的广义坐标向量

T_{E4} : 对称叠层复合材料梁单元的动能

N_4 : 对称叠层复合材料梁单元的势能

l_4 : 对称叠层复合材料梁单元长度

$m_4(\bar{x})$: 对称叠层复合材料梁单元的质量分布函数

ρ_4 : 对称叠层复合材料梁单元材料的平均密度

$\rho_4^{(k)}$: 对称叠层复合材料梁单元第 k 层材料的平均密度

ρ_{4f}, ρ_{4m} : 对称叠层复合材料梁单元第 k 层纤维和基体的密度

v_{4f}, v_{4m} : 对称叠层复合材料梁单元第 k 层纤维和基体的体积百分比

t : 对称叠层复合材料梁单元单层厚度

h : 对称叠层复合材料梁单元每层的厚度

A_4 : 对称叠层复合材料梁单元横截面积

$\dot{W}_{4a}(\bar{x}, t)$: 对称叠层复合材料梁单元任意截面处的横向绝对速度

$\dot{V}_{4a}(\bar{x}, t)$: 对称叠层复合材料梁单元任意截面处的轴向绝对速度

$\bar{m}_4$: 对称叠层复合材料梁单元的质量矩阵

C_{4j} : 对称叠层复合材料梁单元弹性矩阵

ν_{12}, ν_{21} : 对称叠层复合材料梁单元弹主(轴向)泊松比和次泊松比

$\bar{k}_4$: 对称叠层复合材料梁单元的质量矩阵

R_i : 第 i 单元坐标与整体坐标间的转换矩阵

B_i : 第 i 单元局部编号与系统编号间的坐标协调矩阵

U : 系统在整体坐标系中的广义坐标向量

$\ddot{U}_r$: 系统在整体坐标系中的刚体加速度向量

M : 系统的质量矩阵



K : 系统的刚度矩阵

C : 系统的阻尼矩阵

F : 作用于系统的外力向量

K_{01}, K_{01}^* : 含机电耦合项的刚度矩阵分量

U_ω, U_ϵ : 与机构几何尺寸及位置有关的 24 阶系数列阵

T_e : 三相交流电动机电磁转矩

T_{Cu} : 三相交流电动机转子铜耗转矩

T_r : 三相交流电动机负载转矩

T_{r0} : 电动机的空载制动转矩

J_0 : 电动机轴(含转子)的转动惯量

Q : 系统的自激惯性力向量

N : 自激惯性力傅里叶级数的项数

F_{Dk} : 自激惯性力傅里叶级数的第 k 阶简谐项列阵

Q_{Dki} : 自激惯性力傅里叶级数第 k 阶简谐项的幅值

φ_{ki} : 自激惯性力傅里叶级数第 k 阶简谐项的相位角

Ω_1 : 三相交流电动机转速

ϵ : 小项标志符号

ϕ : 正则模态矩阵

η : 模态坐标列阵

T_m : 不同尺度的时间变量

Ω_2 : 外力的激励频率

ω_r : 系统在一个运动周期内第 r 阶固有频率的平均值

U_s : 三相交流电动机定子相电压

I_s : 三相交流电动机定子电流

I_r : 三相交流电动机转子电流

I'_r : 三相交流电动机转子的换算电流

I_0 : 三相交流电动机励磁电流

R_s : 三相交流电动机定子电阻

R_r : 三相交流电动机转子电阻

R'_r : 三相交流电动机转子的换算电阻

R_m : 三相交流电动机励磁电阻

n_1 : 三相交流电动机定子的相数

θ : 三相交流电动机功率因素角; Newmark 积分常数

m : 傅里叶级数的项数

ν_1 : 混合驱动五杆机构中伺服电动机转子的的工作频率

ν_2 : 混合驱动五杆机构中三相交流电动机转子转动频率

ν_3 : ν_1 和 ν_2 的最小公倍数

ν_6 : 混合驱动五杆机构中伺服电动机定子绕组旋转磁场转动频率

ν_7 : 混合驱动五杆机构中三相交流电动机定子绕组旋转磁场转动频率

ν_8 : ν_1, ν_2, ν_6 和 ν_7 的最小公倍数

ζ_n : 五杆机构系统在一个运动周期内的第 n 阶正则振型阻尼比

ω_n : 五杆机构系统在一个运动周期内的第 n 阶正则振型固有频率均值

ξ : Newmark 积分常数

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 弹性连杆机构的研究概况	(1)
1.2 弹性连杆机构非线性振动的研究概况	(2)
1.3 含复合材料构件的弹性连杆机构的振动研究进展	(3)
1.4 弹性连杆机构在机电耦合作用下的非线性振动性能研究进展	(4)
第 2 章 连杆机构的振动方程	(7)
2.1 电动机单元	(8)
2.1.1 三相交流电动机单元	(8)
2.1.2 伺服电动机单元	(13)
2.1.3 直流电动机单元	(18)
2.1.4 电动机单元的运动微分方程	(20)
2.2 金属材料梁单元	(20)
2.2.1 位移模式	(20)
2.2.2 梁单元动能	(21)
2.2.3 梁单元势能	(22)
2.2.4 梁单元的运动微分方程	(22)
2.3 三维编织复合材料梁单元	(23)
2.3.1 单元位移模式	(23)
2.3.2 单元动能	(24)
2.3.3 单元势能	(25)
2.3.4 单元阻尼模型	(27)
2.3.5 梁单元的运动微分方程	(28)
2.4 对称叠层复合材料梁单元	(29)
2.4.1 位移模式	(29)
2.4.2 单元动能	(30)
2.4.3 单元势能	(30)
2.4.4 单元阻尼模型	(33)
2.4.5 梁单元的运动微分方程	(34)
2.5 连杆机构振动方程	(35)
2.5.1 弹性四连杆机构的振动方程	(35)
2.5.2 电动机-弹性四连杆机构系统振动方程	(42)



2.5.3 混合驱动五杆机构系统动力学模型	(45)
第3章 连杆机构系统非线性振动分析	(50)
3.1 系统的自激惯性力分析	(50)
3.1.1 连杆机构运动分析	(50)
3.1.2 连杆机构系统的刚体加速度	(54)
3.1.3 系统的自激惯性力	(57)
3.2 系统的参激振动机理	(61)
3.2.1 四连杆机构系统的参激振动机理	(61)
3.2.2 五连杆机构系统的参激振动机理	(62)
3.3 参激振动的耦合研究	(63)
3.3.1 四连杆机构系统参激振动的耦合	(63)
3.3.2 五连杆机构系统参激振动的耦合	(67)
3.4 共振分析	(69)
3.4.1 电动机-四连杆机构系统共振分析	(69)
3.4.2 混合驱动五杆机构系统共振分析	(85)
第4章 连杆机构的运动稳定性	(105)
4.1 主共振的运动稳定性分析	(105)
4.1.1 电动机-四连杆机构主共振的运动稳定性分析	(105)
4.1.2 混合驱动五连杆机构主共振的运动稳定性分析	(106)
4.2 次谐共振的运动稳定性分析	(107)
4.2.1 电动机-四连杆机构次谐共振的运动稳定性分析	(107)
4.2.2 混合驱动五连杆机构次谐共振的运动稳定性分析	(108)
4.3 超谐共振的运动稳定性分析	(110)
4.3.1 电动机-四连杆机构超谐共振的运动稳定性分析	(110)
4.3.2 混合驱动五连杆机构超谐共振的运动稳定性分析	(111)
4.4 组合共振的运动稳定性分析	(112)
4.4.1 电动机-四连杆机构组合共振的运动稳定性分析	(112)
4.4.2 混合驱动五连杆机构组合共振的运动稳定性分析	(113)
4.5 多重共振的运动稳定性分析	(114)
第5章 振动响应的仿真计算	(116)
5.1 利用迭代式模态叠加多尺度法的求解过程	(116)
5.1.1 迭代式模态叠加多尺度法的定义	(116)
5.1.2 四连杆机构系统动态方程一次近似解的计算	(117)
5.1.3 四连杆机构系统稳态弹性运动精确解的计算	(117)
5.2 利用多尺度-Newmark 法的求解过程	(120)
5.2.1 多尺度-Newmark 法的定义	(120)

5.2.2 五连杆机构系统动态方程一次近似求解	(120)
5.2.3 五连杆机构系统动态方程稳态解	(120)
5.3 实例分析	(121)
5.3.1 含金属构件的四连杆系统	(121)
5.3.2 含叠层复合材料构件的弹性四杆机构系统	(124)
5.3.3 弹性五连杆机构系统响应仿真计算	(129)
参考文献.....	(136)