

清华大学动力学与控制丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目

转动机械的 转子动力学设计

王正 著



配光盘

清华大学出版社

清华大学动力学与控制丛书
“十二五”国家重点图书出版规划项目

转动机械的 转子动力学设计

王 正 著

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书全面系统讨论了转动机械的转子动力学设计问题,包括转子动力学的基础知识和相关的扩充知识、转子动力学设计的流程、计算分析方法以及有关的准则和标准,并用多个工程实例展示了转子动力学设计的多样性和相应的处理方法。随书还附有作者多年研制和使用的转子动力学计算程序包 ROTDYN(练习版)以及计算实例,作为一个实用的设计计算工具,供广大读者练习和使用。本书是一本很实用的、有指导和参考价值的书籍。

本书的设定读者对象为机械、钢铁、能源、石化、交通以及航空、航天等部门从事转动机械设计、制造、运行和振动故障排除等工作的技术人员,也可供高等学校相关专业学生、研究单位的技术人员学习使用。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

转动机械的转子动力学设计/王正著.--北京:清华大学出版社,2015

(清华大学动力学与控制丛书)

ISBN 978-7-302-40650-1

I. ①转… II. ①王… III. ①转子动力学—机械设计 IV. ①TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 153208 号

责任编辑:佟丽霞

封面设计:常雪影

责任校对:王淑云

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:三河市君旺印务有限公司

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:170mm×230mm 印 张:16.25 字 数:325 千字

(附光盘 1 张)

版 次:2015 年 11 月第 1 版

印 次:2015 年 11 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:42.00 元

产品编号:061625-01

前言

转子是各种转动机械中转动部件的力学通称。转子动力学是一门应用性学科,它研究转子的各种动力学特性和动力学现象,是转动机械动力学问题的核心内容。

转动机械在国民经济许多部门中应用十分广泛,而且也是不少制造部门的主要产品。我国在现代化过程中,特别是近三十多年,学习和追赶先进国家,转动机械制造水平有了极大的提高,应用领域也日益扩展。例如大型汽轮发电机组的装机量和产量都已经跃居世界前列,产品还出口到许多国家。转子动力学这一学科也伴随着得到了蓬勃发展。但是要看到,今天我们还不是转动机械自主研发的强国,特别是航空发动机、重型燃气轮机等高端转动机械的研发力量还很薄弱而且分散,制造水平还相当落后,这对于国民经济的发展、国防实力的增强有很大影响。可见,转动机械研发和制造还有许多艰巨的工作要做,转子动力学的理论研究和工程应用也有广阔的发展前景。

在转子动力学过去的发展过程中,本人有幸参与做了一些工作:在学校开设有关课程、编写教材、培养研究生,参与筹建专业学会,推进和开展国内外学术交流,同时积极与工厂和研究单位合作,承担国家和企业有关大型转动机械的设计和振动故障分析等工程课题,编制转子动力学计算程序等。

在这过程中,本人深感加强学术研究和工程应用之间联系的重要性,故在一生的教学和科研工作中一直努力地践行这一认识。1999年退休后,还数十次为工程技术人员开设讲座,普及转子动力学和转动机械监测和诊断等知识和技术,交流和探讨工矿企业中各种机械振动问题等。本人还注意到,国内有关转子动力学的书籍,主要是几本教材和专著,其内容的选编和论述的形式都不大适合于工程技术人员阅读。因此,一直想为工程技术人员写一本有关转子动力学的书籍,以填补此空缺。但由于种种原因,多年未能动笔。今天受到内外形势的推动,终于下决心完成了本书,以了却夙愿。

本书以多次讲座资料为基础,综合几十年来在教学和处理工程问题中积累的資料,以工程技术人员为主要读者对象,以普及转子动力学等相关知识,提高转子动力学设计水平为目的,以期在学术研究和工程应用之间搭建一座小桥梁。因此,本书适当设定阅读所需的知识门槛,在论述中尽量减少数学演绎,努力阐明物理概念,注重理论和方法的实际应用。随书还附有本人几十年使用、不断改进和完善的转子动力学计算程序包 ROTDYN(练习版)以及许多算例,作为设计计算工具,供广大读者练习和使用参考。

本书名为“设计”，但是其主要内容是设计所涉及的基本知识和计算分析，这些仅是设计的重要环节，并不是设计工作的全部。许多设计问题难以用数学来表达，也不能靠计算来解决。对于设计工程师来说，与计算分析能力同样重要的还有相关的专业知识、实践经验，以及化解矛盾和权衡利弊的综合能力。后者要靠长期工程实践中有意识地积累而成，非一本书所能提供。

本书第1章转子动力学的基本知识、第2章转子的平衡，这是设计者的基础知识。第6章转动机械的振动测试、第7章转动机械的状态监测与故障诊断，这是扩充知识。第3章转子动力学设计、第4章转子动力学的计算分析、第5章转子动力学有关的规范和标准，这是设计者主要工作内容。对于第4章中必须涉及的数学推演，读者可根据对计算方法的兴趣，或详读，或浏览。但其中精选的几个实例显示了转子动力学设计要求的多样性和相应的处理方法，这都是作者所亲历，颇具参考价值。第8章为 ROTDYN 程序包中各程序的功能和使用的概要介绍，内容摘录自各程序的说明书，印成纸面材料以便研读。本书各章内容基本上是独立的，读者可以根据需要选择阅读。

最后，本人衷心地感谢我的老师、同仁、朋友和家人。本书中涉及的知识 and 成果，都是在他们的指导、帮助、合作和支持下取得的。在收集整理有关资料和撰写本书稿时，眼前常常浮现出他们的身影和面容。只因人数众多无法在此逐一列出他们的姓名。

在本书编辑出版过程中，清华大学出版社等许多同志付出了辛勤的劳动，本人在此一并表示感谢。

限于本人的水平和能力，本书难免有缺点，甚至错误。欢迎读者和各界专家批评指正。

王 正

于北京清华园

2014 年 12 月初稿，2015 年 9 月修改

E-mail: wangzlip@tsinghua. edu. cn

目录

第 1 章 转子动力学的基本知识	1
1.1 转子动力学的发展及其内容	2
1.2 转子的模态特性	3
1.2.1 振动系统的模态	3
1.2.2 转子的模态	5
1.2.3 圆盘的转动惯量对转子模态的影响	9
1.2.4 算例	11
1.2.5 支承刚度对转子模态的影响	13
1.3 转子的临界转速	14
1.3.1 转子的临界转速	14
1.3.2 轴系的临界转速和振型	15
1.4 转子的不平衡响应	16
1.4.1 单圆盘转子的幅频特性与相频特性	17
1.4.2 同步正进动的特点	19
1.4.3 不平衡响应的确定	20
1.5 转子的稳定性	20
1.5.1 自激振动的机理	21
1.5.2 机组油膜失稳事故亲历	23
1.5.3 油膜轴承的工作状态	25
1.5.4 油膜轴承的失稳机理	27
1.5.5 油膜失稳的过程,从油膜涡动到油膜振荡	28
1.5.6 油膜失稳的治理	30
1.5.7 其他一些失稳因素的分析	31
1.5.8 自激振动与强迫振动的对比	34
参考文献	35
第 2 章 转子的平衡	37
2.1 转子不平衡的原因及其影响	38
2.2 刚性转子与挠性转子	38
2.3 刚性转子的平衡原理和平衡方法	39
2.3.1 刚性转子的不平衡形式	39
2.3.2 刚性转子的平衡原理	40

2.3.3 平衡机平衡	41
2.3.4 现场平衡	43
2.3.5 现场平衡的方法——影响系数法	43
2.3.6 刚性转子的平衡品质	45
2.4 挠性转子的平衡原理和方法	47
2.4.1 挠性转子不平衡的特点	47
2.4.2 模态平衡法	48
2.4.3 影响系数法	48
2.5 实际挠性转子的平衡策略和评定准则	49
参考文献	51
第3章 转子动力学设计	53
3.1 转子动力学设计的意义和目标	54
3.2 转子动力学设计的内容	55
3.3 转子动力学设计的流程	55
3.4 设计实例	58
3.4.1 转子的基本数据和建模	58
3.4.2 无阻尼固有频率和临界转速	59
3.4.3 阻尼固有频率和临界转速	61
3.4.4 不平衡响应计算与评价	63
3.4.5 稳定性的补充计算	64
3.4.6 不同轴承支承的转子的稳定性比较	65
3.5 若干设计方法的讨论	67
3.5.1 逆向设计	67
3.5.2 相似设计	68
3.5.3 转子设计的相似准则	69
参考文献	73
第4章 转子动力学的计算分析	75
4.1 转子动力学计算分析的特点	76
4.2 转子-支承系统的建模	77
4.3 无阻尼转子系统的计算分析	82
4.3.1 典型构件的传递矩阵	83
4.3.2 Prohl 传递矩阵法计算临界转速和振型	85
4.3.3 Riccati 传递矩阵法计算临界转速和振型	87
4.3.4 Riccati 传递矩阵法的奇点及其消除	89
4.3.5 无阻尼转子系统的不平衡响应的计算	91

4.3.6 实例 1——空气压缩机的临界转速和临界负荷	92
4.3.7 实例 2——汽轮发电机组轴系的临界转速	96
4.3.8 实例 3——搅拌机轴的设计优化	97
4.4 有阻尼转子系统的计算分析	101
4.4.1 振动量的复数表示	101
4.4.2 Riccati 传递矩阵法计算固有频率和稳定性	102
4.4.3 有阻尼转子系统的不平衡响应的计算	106
4.4.4 实例 4——高速离心机结构参数的优化	109
4.4.5 实例 5——提高 200MW 汽轮发电机组轴系的稳定性	112
4.5 轴系扭转振动的计算分析	116
4.5.1 扭转振动固有频率和振型的计算	116
4.5.2 扭转振动瞬态响应的计算	118
4.5.3 实例 6——600MW 汽轮发电机组轴系的扭转振动设计	120
4.6 轴系各轴承安装标高及负荷分配	124
4.6.1 轴系理想的安装状态	125
4.6.2 轴系实际的安装状态及轴承标高的计算	125
4.6.3 实例 7——某燃气-蒸汽轮发电机组轴系 各轴承安装标高的确定	126
4.7 复杂转子系统动力特性的计算	128
4.7.1 复杂转子系统的计算模型	128
4.7.2 复杂转子系统动力特性的计算方法——双重传递矩阵法	130
4.7.3 实例 8——某航空发动机双转子系统的临界转速	134
参考文献	137
第 5 章 转子动力学有关的规范和标准	139
5.1 规范和标准的重要性	140
5.2 与设计有关的规范	140
5.2.1 关于转子的临界转速	140
5.2.2 关于转子的平衡品质和不平衡响应	140
5.2.3 关于转子系统的对数衰减率	141
5.2.4 关于品质因子 Q	141
5.2.5 关于扭转振动	143
5.3 与验收和运行有关的标准	144
5.3.1 GB/T 6075 在非转动部件上测量和评价机器的机械振动	144
5.3.2 GB/T 11348 旋转机械转轴径向振动的测量和评定	146
参考文献	148

第 6 章 转动机械的振动测试	151
6.1 振动测试在转动机械设计中的作用	152
6.2 振动测量框图	152
6.3 常用的几种振动测量传感器	153
6.3.1 磁电速度传感器	153
6.3.2 压电加速度传感器	155
6.3.3 涡流位移传感器	157
6.4 转动机器振动测点的布置和测量参数	160
6.5 转动机械振动测试的几个特殊问题	162
6.5.1 频率分析	162
6.5.2 基频测量	163
6.5.3 相位测量	163
6.5.4 转速测量	165
6.6 转动机械振动的图示	165
6.6.1 定转速状态的图形	165
6.6.2 变转速状态的图形	167
6.7 与转动机械设计有关的振动试验	171
6.7.1 试验模态分析	171
6.7.2 转子固有频率的测定	171
6.7.3 轴承座动刚度的测试	173
6.7.4 轴承油膜动力系数的测定	173
参考文献	174
第 7 章 转动机械的状态监测与故障诊断	175
7.1 状态监测与故障诊断的作用和内容	176
7.2 监测仪器系统	177
7.2.1 监测仪器系统的分类	177
7.2.2 监测仪器系统选用的原则	178
7.3 故障诊断的方法介绍	179
7.3.1 频谱分析法	179
7.3.2 趋势分析法	186
参考文献	187
第 8 章 转子动力学计算程序包 ROTDYN 介绍	189
8.1 无阻尼转子系统动力计算程序 TBROTOR	190
8.2 有阻尼转子系统动力计算程序 ROTSTB	200
8.3 复杂转子系统动力计算程序 SHAFTS	210

8.4 转子扭转振动计算程序 TORVIB	218
8.5 转子平衡计算程序 BALANCE	226
8.6 轴系各轴承安装标高计算程序 ROTLINE	230
8.7 绘制平面图形程序 DRAW2D	236
8.8 绘制立体图形程序 DRAW3D	240
名词索引	243
附光盘：转动机械的转子动力学设计计算程序包 ROTDYN(练习版)	

第1章

转子动力学的基本知识

1.1 转子动力学的发展及其内容

转动机械中的转动部件,在力学中称为转子。转子动力学是一门应用性的学科,它的任务是研究转子的动力学特性及其各种动力学现象,它是转动机械的设计、制造、安全运行、故障诊断等的动力学基础。

转子动力学是20世纪初从力学的振动理论中分化出来的,学科产生和发展是与各种工业中对于高功率、高转速、大型转动机械的需求有密切关系。例如:能源工业中的汽轮机、燃气轮机、水轮机,电力工业中的发电机和大电动机,航空、航海和军事工业中各种发动机,化工工业中的各种压缩机、泵、分离机、风机、电机等。

1869年 Rankine W J 著的《关于旋转轴的离心力》可以算是第一篇转子动力学文献,其中反映了对于转子运动的启蒙认识。1919年 Jeffcott H H 制造出第一个超临界转子,正确地解释了超临界转子的自动定心现象,克服了临界转速这一提高转速的瓶颈。由此,转动机械的转速有突破性的提高,促进了生产力的发展。转子动力学的研究也随之得到了蓬勃发展,临界转速的计算方法,转子平衡的理论和平衡方法,转子振动的测量等都得到了深入和广泛的研究。但是转速的提高也提出了许多前所未有的新问题,特别是轴承和密封等的流固耦合力以及相关的稳定性问题。从20世纪60年代开始,多国学者开展了关于高性能转动机械稳定性的研究和实践,取得了许多成果,但这一长达半世纪的过程至今也不能说已经终结^[1]。

1974年理论力学与应用力学国际联合会(IUTAM)在丹麦哥本哈根召开了转子动力学国际会议,第一次使用 **ROTOR DYNAMICS** 这个名称,标志着转子动力学学科的独立。此后,英国机械工程师学会(I Mech E)、机械与机构理论国际联合会(IFTOMM)和美国机械工程师协会(ASME)等都定期举办关于转子动力学的学术会议,多年下来积累的相关文献有几十万之多。其中,我国学者和技术人员也有许多贡献。

在我国,转子动力学的研究始于20世纪60年代,在研发国产汽轮机组、航空发动机、水轮机等大型转动机械的推动下,有关工厂与一些学校、研究所合作,开始了起步的研究,解决了一些生产急需的问题,初步形成了一支研究队伍。1985年在中国机械工程学会和中国振动工程学会下,成立了转子动力学专业委员会,从1986年起每三年一次组织学术讨论会^[3]。此期间,还出版了多本转子动力学教材^[4~6]和专著^[7,8],在学校培养这学科方向的专门人才,并采取派出去和请进来的形式,积极参与国际学术交流。这些对于推动转子动力学在我国的发展和应用都起了积极的作用。近半个世纪来,由于国家的支持和各方面的努力,特别是在解决我国大型转动机械的工程问题中的锻炼,转子动力学研究的理论水平已经接近国际水平,但在实验研究和工业应用方面还有较大差距,转子动力学设计队伍有待稳定和提高。目前,正是

新老队伍交替时期,期待中青年科技队伍继续挑起发展学科、解决工程问题的重担,在实现中国梦的奋斗中发挥更大的作用。

目前,转子动力学建模方法和相应的计算工具,能够模拟转子的各种重要的动力学特性,可以考虑结构(外壳)、轴承、密封等的流固耦合等对转子的重要影响,能开展高速转子的振动预测和各种复杂的动力学现象的研究,包括非线性问题。工业部门所制造的转动机械的单机功率已经达到 1000MW 级,转子的转速可以达到每分钟数十万转。

考虑到上述成果和进步,也许有人认为这领域的研究差不多已经到头了。然而,几个国际学术会议的活动表明,转子动力学仍然是学术研究的一个热点领域,同时也是工程实践的重要领域。由于这学科具有与生产实际密切联系的特点,可以说在转动机械研发中不断出现的各种动力学问题,都是转子动力学研究的新课题。1980 年作者曾就转子动力学的发展方向问题请教著名转子动力学专家、丹麦学者 Lund J W,他回答说,工业中提出的问題,就是我们的研究方向。当前转子动力学研究的新领域^[15]如:①主动抑制振动的智能转动机械,②磁轴承、压电等各种新型执行器,③转动电力机械的机电耦合,④状态监测和设备诊断,⑤转子动力学参数的测试和识别方法,⑥微型转动机械等。

本书讨论转子动力学传统领域的内容^[2]——转子横向弯曲振动的有关动力学问题。主要有三大问题:

临界转速——物理概念,确定临界转速的方法,影响临界转速的因素;

不平衡响应——不平衡响应的确定,不平衡转子的运动形态,转子平衡理论和平衡方法;

稳定性——转子失稳因素和失稳机理,提高转子稳定性的措施等。

其他,如转子的瞬态响应、扭转振动等一般也认为是属于转子动力学的研究内容。

下面,我们从振动系统开始,逐步深入来讨论这些内容。

1.2 转子的模态特性

1.2.1 振动系统的模态

我们把能够发生机械振动的系统称为机械振动系统,简称振动系统,如一个机器或其零部件。当然,转子也是一个振动系统。

在力学中,为了描述振动系统的运动,需要引入一些坐标量,如系统中某处的位移、转角等。根据系统的复杂程度和处理方法的不同,需要坐标量的数目有所不同。确定系统运动所需的独立坐标量的数目,称为系统的自由度。

根据振动理论^[9]和工程实践,我们知道:每个振动系统都有若干个特殊的振动形态,称为模态,模态的数目等于系统的自由度数目。

每一模态包括下列模态参数:

- 模态频率,又称固有频率^①——描述模态振动的快慢的物理量,记作 ω_n (单位:弧度/秒)或 f_n (单位:Hz,有时用次/分);
- 模态阻尼(阻尼比)——描述模态振动衰减的快慢的物理量,记作 ζ_n (无量纲量);
- 模态振型(振型)——在模态振动中,描述系统的各个坐标的振动幅度之间保持确定的大小比例。单自由度系统仅一个坐标量,故无此项。

现在以几个简单振动系统为例来说明其模态。图 1-1 为由两个滑块和 3 个弹簧组成的一个振动系统,滑块的质量均为 m ,可在水平轨道内左右滑动;弹簧的刚度系数均为 k 。我们可分别取两个滑块的水平位移 x_1, x_2 作为确定系统运动的坐标,故这是一个两自由度系统。根据振动理论^[9]的分析,系统有两个模态。模态频率相应为 $\omega_1 = \sqrt{\frac{k}{m}}$, $\omega_2 = \sqrt{\frac{3k}{m}}$, 模态阻尼均为零,两个振型分别为 $X_1 : X_2 = 1 : 1$ 和 $X_1 : X_2 = 1 : -1$ 。为表示清晰起见,把在水平方向的 X_1, X_2 画在铅垂方向,如图 1-1 所示。此外,振型表示的是各坐标之间的比例,没有绝对大小,为明显起见,通常以较大的尺度绘出。

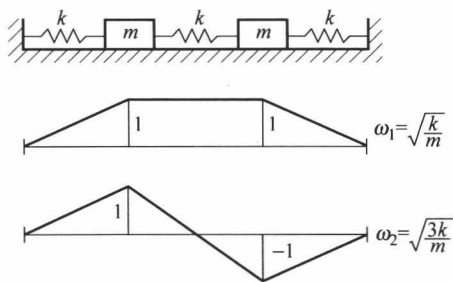


图 1-1 一个两自由度系统的模态

在前一个模态中,两滑块振动的频率均为 ω_1 , X_1, X_2 振动幅度相等,运动方向相同。这样在这一模态振动中,其中间弹簧不变形,犹如一根杆。在后一个模态中,两滑块振动的频率均为 ω_2 , X_1, X_2 振动幅度相等,但运动方向相反。故在这一模态振动中,中间弹簧的中点始终不动,这个点称为节点。

① 在振动理论和转子动力学中,与振动或转动有关的几个物理量,是有不同的单位,常用的符号也不同。现简要说明如下:(1)频率用 f 表示,单位为 Hz,或次每分(1/min);(2)角频率和角速度用 ω 或 Ω 表示,单位为弧度每秒(rad/s);(3)转速用 n 表示,单位为转数每分(r/min)或转数每秒(r/s)。但是在文字论述时,由于习惯,这几个量的名词和符号常有混用情形。当然,在代入数值作计算时,必须严格区分。

再来看图 1-2 所示的振动系统。在一根等截面的弹性横梁上等距离安装 3 个重物。各重物的质量均为 m ，梁的材料弹性模量为 E ，抗弯截面矩为 I ，其质量较小，可略去不计。我们取 3 个重物的铅垂向位移为描述梁的横向振动的坐标量，故这系统的自由度数为 3。

这系统有三个模态，其模态频率 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 和相应的 3 个振型如图 1-2 下部所示，模态阻尼均为零。在第 2、3 个振型中，可以看到分别有 1 个和 2 个节点。

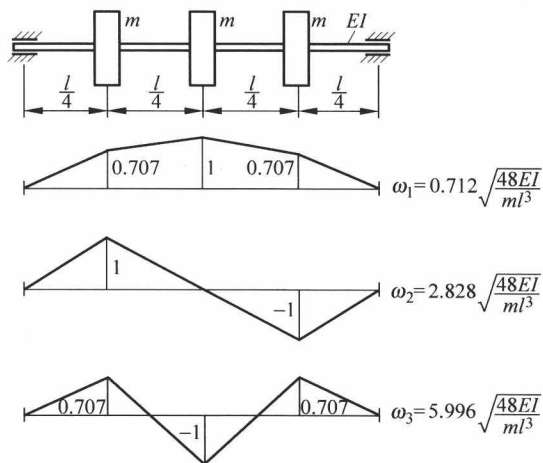


图 1-2 一个三自由度系统的模态

在多自由度系统中，通常将各模态按其频率从小到大排列，称为第 1 阶模态、第 2 阶模态等。

从上述各例子中看到，振动系统的模态及其参数，是由系统本身的质量和刚度的大小以及它们的分布所确定的，不受其他外界条件的影响，因此称为“固有”的。我们设计一个机器或者零件，确定了它的尺寸、材质和制造工艺，不论它是否已经制造出来，它的模态事实上就已经确定了，只是我们知道或不知道而已。

确定系统模态参数的方法有两类：一是计算方法，包括理论计算或数值计算；另一是实验测试。前者一般用于设计阶段，后者用于制造完成后的检验，或者参数识别。

模态是振动系统特有的一种振动形态，它就好像是振动系统的“基因”，决定了振动系统的各种动力学现象。为了了解振动系统的各种动力学现象和规律，必须首先牢牢掌握模态这一概念。

1.2.2 转子的模态

转子动力学的研究对象——转子，是一个多自由度振动系统，它既有多自由振动系统的一般力学特性，即转子也有模态；但它又有其特殊性，即其模态是随转速而变

化的。

我们先从一个单圆盘转子开始讨论,再推广到多自由度的转子系统。

如图 1-3 所示的单圆盘转子由一根细的立轴^①和一个圆盘构成。圆盘质量为 m , 置于细轴的中央。轴的质量较小, 可以不计。轴的两端由刚性轴承支承, 轴中央的刚度为 k , 即如果轴中央有弯曲变形 r , 那么, 圆盘受到的弹性恢复力为 $F = k \times r$, 方向垂直于轴线指向 O_1 点。转子的转动角速度为 Ω 。取固定坐标系 $Oxyz$, 转子的轴线沿 Oz , 圆盘的圆心为 A 。

选圆盘圆心的坐标 x, y 来确定圆盘的运动, 故它具有两个自由度。

根据质心运动定理^[10], 有

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -F \frac{x}{r} = -kx, \quad m \frac{d^2 y}{dt^2} = -F \frac{y}{r} = -ky$$

采用复数形式来表达更为简便, 即令

$$\rho = x + iy, \quad (i = \sqrt{-1})$$

上述两方程合成为

$$m \frac{d^2 \rho}{dt^2} + k\rho = 0 \quad (1-1)$$

其解的形式为 $\rho = e^{i\omega t}$, 代入式(1-1)后, 得到两个特征根

$$\omega_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{k}{m}}$$

故方程式的通解为

$$\rho = B_1 e^{i\omega_1 t} + B_2 e^{i\omega_2 t} \quad (1-2)$$

其中 B_1, B_2 为由起始条件决定的常数。

式(1-2)中的每一项都代表转子的一个模态运动——圆盘中心 A 绕 O_1 点在圆盘平面内作圆周运动。此时, 轴本身仍以角速度 Ω 在转动(自转), 同时, 弯曲变形了的轴还以角速度 ω 绕 Oz 轴线转动(公转), 这种运动称为**涡动**。在第一项代表的模态中, 涡动角速度 ω_1 为负值, 说明涡动方向和转子的转动方向相反, 称为**反向涡动**, 或**反进动**; 在第二项代表的模态中, 涡动角速度 ω_2 为正值, 表明涡动方向和转子的转动方向相同, 称为**正向涡动**, 或**正进动**。图 1-4 为这两个模态的示意。本系统有两

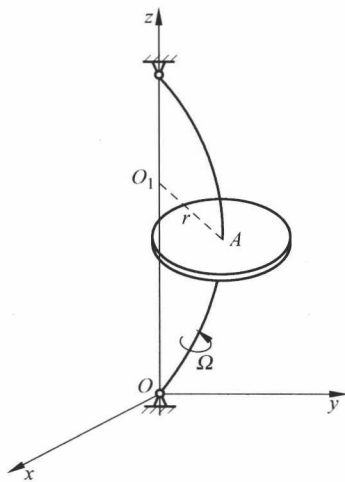


图 1-3 单圆盘转子

^① 工程中转子系统以卧轴为多, 此处分析取立轴, 目的是避开重力引起的挠曲问题, 简化讨论。事实上, 静挠曲仅改变转子的平衡位置, 对其他分析结果没有影响, 参见文献[4]。

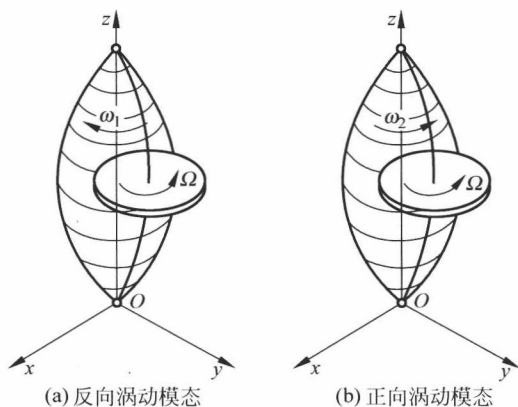


图 1-4 单圆盘转子的模态

个自由度,应有两个模态。

如果任给圆盘一个横向冲击,以激发转子的自由振动,一般来说,上述两个模态会同时激发。根据激发的不同,两模态所占的大小比例不同,圆盘的涡动轨迹会是不同形状的椭圆(特殊情况为直线),涡动方向可能为正,也可能为负。

如果将转子的模态运动投影到 xOz 或 yOz 平面内,那么,看到的是轴以频率 ω 在作横向弯曲的简谐振动。此外,转子运动方程式(1-1)的实部或虚部,在形式上也与轴的平面弯曲振动的方程相同。因此,我们常用分析轴的横向振动的方法来讨论转子的运动。但从概念上必须把振动和涡动两种运动加以区别。

再来看一个多圆盘的转子,如图 1-5(a)。设两个圆盘的质量均为 m ,钢质直轴的直径为 d ,支在两个刚性支承上。轴跨度为 $4L$,外伸端长 L 。轴的转速为 Ω 。研究其横向运动。

现来分析转子系统的模态。先把两个圆盘视为 2 个质点,即考虑其质量,不计其尺寸大小,每个质点在铅垂方向(纸面内)和水平方向(垂直纸面)各有一个位移自由度,系统共有 4 个自由度,故此转子系统应有 4 个模态。因为系统在水平向和铅垂向完全相同,故 4 个模态频率中分为 2 组,每组中一正一负,且其绝对值相等。4 个振型相应也分为两组,每组有轴的弯曲形状相同的正进动和反进动模态各一个。

如果在本例中代入必要的尺寸和参数,经计算得到的模态如图 1-5(b), (c), 图中仅画出轴上一些点的涡动轨迹,未画出圆盘。

再如,图 1-6 为一个发电机转子的简图,这转子为一个弹性体,它具有无穷多个自由度,当然相应有无穷多个模态。在处理实际问题时,常把它适当简化,“缩减”其自由度数,使成为有限多自由度系统,相应的模态数目也减少了。图中给出它的前 3 阶模态频率和相应的振型,这里给出的是振型在一个平面内的投影。我们仅关心这 3 个低阶模态,再高阶的模态,其频率远高于转子的工作转速,一般不必再加以关注了。