

# 对联邦德国工程力学研究的看法和建议\*

K. Magnus

## 1. 力学研究的现状

力学是一门主要用数学演绎方法解决工程问题的必不可缺的学科。但要真正对工程技术作出有益的贡献,既不能仅仅依靠演绎,也不能仅仅依靠归纳。比如天体力学可以直接指导宇航技术的实践,但材料力学却与实验紧密联系。在一般情况下必须既要仔细归纳经验,又要充分利用理论工具。现代计算技术的发展给理论研究创造了极好的条件,但也出现了过分迷信数值计算而忽视实验的倾向。其结果是:计算数据和图表大量涌现,却作不出令人信服的结论。对每个力学工作者来说,最重要的任务是致力于理论与实验之间的平衡。先用简单的理论思考分析实验现象,然后利用实验观察到的现象和数据进一步改进理论,并从中得到启示,使客观事物朝所希望的方向发展。在此过程中必须建立物理和数学模型,例如近年来在机械工程中使用的有限元模型和多刚体模型。有时所选择的模型在计算方面显得过于浪费,只有当某种理论已被证明确实有效时,这种浪费才能被允许。对于那些实验研究过于昂贵的研究项目,例如宇航技术中的发展趋势和参数优化研究等,可以充分利用理论工具来解决。但对于复杂的机械系统,纯理论研究只能收到有限的效果,用实验研究作出结论要付出很高的费用,必须寻求有效的量测手段。不同部门的科学家或科研集体必须互相协作。

## 2. 多刚体系统的一般理论

1977年秋季国际理论和应用力学联合会(IUTAM)在慕尼黑召开了多刚体系统动力学国际讨论会,各个部门的研究人员从各个侧面讨论了这种由许多刚体联结起来的力学系统的理论计算问题。尽管多刚体系统理论已有近200年历史,有从欧拉到拉格朗日的研究成果可供应用,但现代计算机的发展却带来了全新的课题,即建立适合计算机要求的多刚体模型,提出相应的命题和解题方法。重要的问题列举如下:模型的建立和简化,系统的分解和重新组合;考虑运动学关系时,图论、拓扑学和符号公式推导等工具的应用;对运动学回路系统的处理;带弹性体或流体分体的系统(混合多体问题);仅在游戏中出现的特殊多体系统;适合多体系统特点的稳定性概念和判据。

多体系统理论问题主要是由宇航技术,尤其是人造卫星技术提出的,但它的研究成果可以用到车辆、转子和机床等技术领域,也可在机械手、机器人的研究工作中得到进一步发展。在联邦德国的柏林、汉诺威、慕尼黑、卡尔斯鲁厄,斯图加特等地的许多大学、工厂和研究所,正从事这方面的研究工作,并与比利时、巴西、英国、荷兰、奥地利、瑞士和美国有着密切的联系。

2.1. 车辆系统 近年来研究兴趣集中于磁悬浮列车和轮轨系统。这两类车辆的理论和实验研究工作在世界范围内进行,召开了许多次国际性会议。

\* 本文作者 K. Magnus 是已退休的原慕尼黑工业大学教授,力学研究所所长,原西德力学杂志(Ingenieur Archiv)总编辑,这是他于1983年为西德科技协会(Deutsche Forschungs-gemeinschaft)所写的一篇特别报告。

磁悬浮列车必须采用多刚体模型,因为无论列车或导轨都不能看作是单个刚体。除了6个刚体自由度以外必须增加弹性变形自由度,应根据具体情况和要求来选择不同的结构模型。基本研究方法正在探讨中,并已用于具体的设计工作。这项研究工作必须与工业部门紧密合作。有两个问题应特别指出:

1) 通常的导轨由分离的单个部件(梁)组成,车辆不断从一个导轨部件转移到原来静止的另一个导轨部件。必须使这种转移关系公式化,它可能导致脉冲形式的参数振动去附加确定那些确定性扰动或随机性扰动。随着车速变化以及车辆长度与导轨部件长度比的变化,可能出现强迫振动与参数振动同时发生的复杂情况。这可以适当协调车辆和导轨部件的长度来减轻。对于不规则的随机激励也可用实践中已行之有效的方法予以排除。

2) 磁悬浮列车控制系统的设计,必须在可靠性和舒适性之间谋求折衷方案。一种新型的分散控制方案称为“磁轮原理”,其基本思想是对每一块支承磁铁配置一套独立的控制器,类似于单个车轮。其固有频率和振型必须仔细确定,通过控制器与总体控制系统的衔接方式来满足各种要求。这种控制系统还必须不受速度、负载、导轨气隙等参数变化的影响,以适应实际运行条件。此外,抗干扰性概念和相应的判据也必须予以明确。

2.2. 转子系统 带转动部件的多刚体系统在工程中极为常见。其中的离心机和涡轮机,过去曾作过大量研究,其研究结果已多方进行过报道,集中在以下几个方面:转子系统力学方程的建立;临界转速与变形和负载的关系;由气流效应引起的自激振动;利用主动阻尼的超临界工作;兼起支承和控制作用的主动支座。

转子系统的动力学方程必须适当变换,以适应数字计算机的要求。这类工作也适合于带可控转子的系统,例如带陀螺的导航系统,或带控制飞轮的人造卫星。对气体离心机的高要求,促使我们重新研究经典的临界转速问题,振动的传统研究方法多数已不能使用,因为非保守的支座反力和气流摩擦效应,都可能引起转子的自激振动。当整体结构方案已经确定后,这种振动只能部分地采取措施消除,例如采用“主动支座”或“主动阻尼”,即利用控制系统产生的主动力代替被动力的方法。这里要用到现代控制理论的研究方法。利用可控无接触磁支承,可使控制方案得到改善,因为它能提高转子转速而使磨损减到极小。与带润滑的滑动或滚珠轴承不同,磁支承也能在真空中使用,例如用于半导体工业的离心机。对于特细或特薄的高速转子,其固有振动可能显著影响控制规律而必须考虑。经典力学的常用方法可能要修改,例如一般的变形体系统不采用或很少采用与刚体固结的坐标系。此外,对变形体转子或非定常的刚体转子,其动力学方程中都可能非保守项出现。

2.3. 混合多体系统 变形对运动的影响在车辆和转子系统中已经存在。对于轻型结构,如人造卫星、宇宙飞船和飞机,这种影响尤为显著。已出现大量文章,研究一般混合系统的数学模型和动力学问题,包括带控制的混合系统。在工业机器人的研究中,由于对工作速度和定位精度的要求不断提高,也必须考虑变形问题。除了要研究计算方法和控制方式以外,首先要对实际机器进行设计和实验,当然可将机器人作为一种特殊机床用有限元方法进行分析,困难在于所要求的控制运动往往伴随着很大的变形。必须选择适当的模型和适合于多体系统的方法进行研究。混合多体系统理论中的新结果,是利用级数展开使微分方程离散化的方法,它可使多数非线性方程线性化,也可用于一般多体系统的数值计算。现在已有了若干算例和实验验证。

### 3. 模型化和稳定性理论

在多体问题中,已谈到必须对复杂的实际系统建立尽量简单的力学或数学模型,其复杂程度取决于研究课题的要求。简单的刚体模型对研究机器人的运动学已足够,但分析和综合控制过程时,则必须改为混合系统模型。模型化方面的工作目前已取得很大的进展。利用模型进行的基本工作是识别,应该将结构识别和参数识别区分开来。通常是对给定的系统作输入-输出量测,这种方法常常很浪费,而必须予以简化和紧缩。要探讨用哪一种测量方法最有利,还要研究测量点的数量和布局。应该指出系统在确定位置的能观性与在同一位置的能控性有紧密联系。

一般力学系统的稳定性理论已取得很大成就,我们只要利用经典的数学形式稳定性判据进行计算,并给以物理解释,甚至能获得全局稳定特性。通常要处理的矩阵形式运动方程包含五种力——质量力、阻尼力、陀螺力、保守和非保守的位置力。对研究和设计人员最重要的工具是全局稳定性,引进了一些新概念,如完全阻尼(durchdringende Dämpfung),颤动失稳(Flatter-Instabilität),发散失稳(Divergenz-Instabilität),输入输出稳定性(Ein-Ausgangs-Stabilität)等。可以预计,对动力学系统的运动特性将会有更精确的了解。稳定性理论的一个重要分支,是分枝点理论和分枝解,这个很久以来已研究得十分清楚的问题,近来又重新提出。它可用来预测或解释非线性系统的跳跃现象(突变),不仅能给出跳跃的判据,而且能在全局范围内预测其突变类型。许多研究集体正在将这一有趣的理论用于不同的具体问题。此外,非线性微分方程定性理论,可导出解的混沌特性,这可用来加深对力学中不稳定现象的理解,例如对湍流的理解。

### 4. 振动理论

振动理论作为一个已濒临枯竭的领域,近年来又有了新发展。对于多刚体系统和多自由度振动系统,发展了新的研究方法以适应数字计算机的要求。对求解方法的系统化,也有利于加深对振动系统运动特性的理解。现在不仅可对树形刚体链的耦合振动进行数值分析,而且可以处理内部带回路的刚体链,例如机械传动系统。特别值得注意的是发展了一种程序系统,可以利用数字计算机,对任意给定的多刚体系统的结构方案自动进行运动方程的文字推导。在计算大型振动链的特征值方面也有了新方法。重要的问题是使微分方程降阶,“动力学凝聚方法”取得很大进展。大系统受隐含阻尼器的影响问题,也有了适当的计算方法。带参数激励的振动系统,不仅在现象上,而且在数量上都分析得很多。不久前在多自由度系统的计算工作中,繁琐的计算工作量被新的近似方法所减轻而不影响精度。引入了一种在泛函基础上建立起来的特殊稳定性概念——“ $L_2$ 稳定性”,从而使大系统参数共振和组合共振的稳定域计算工作量,仅及精确的Floquet理论所要求计算量的千分之一。此方法可用来计算直齿轮和斜齿轮由于刚度的周期性变化而产生的参数自激振动。

### 5. 结束语

作者认为以下问题具有国际先进水平:发展计算多刚体系统的方法和公式,用于解决各种工程技术问题;为转子系统设计带受控主动式支座的最优控制方案;发展动力学系统稳定性理论,引入新概念,提出全局稳定性的新命题;大系统的分块识别问题;机械传动系统窜动问题的分析方法和结果。

应该注意的问题:经常进行内部讨论以及与相邻学科的讨论;加强地区性和国际间的交

流与接触；寻求学科之间的渗透，目前在多刚体系统和振动方面取得的成果，要归功于力学方法与控制技术的结合，稳定性理论则是力学、信息论、控制论和数学（微分方程定性理论）共同努力的结果；制定若干年的科研计划，使科研人员能纵览全局；注意在科研手段使用方面的灵活性。

（上海交通大学 刘延柱译）

## 在微观结构基础上骨的粘弹性性能分析

T. Gottesman Z. Hashin

### 引言

晚近，骨结构的清晰图象已经得到。密质骨是复合材料，它由骨单位、间质系统和把二者粘结在一起的有机粘弹性粘结物质所组成。Ascenzi, Bonucci (1967) (1972) 首次将骨单位分离出来；之后，Trasca 等 (1976) 用改进了的技术又作了分离。骨单位为空心柱体 (图 1)，它由胶原纤维及羟磷灰石晶体构成。

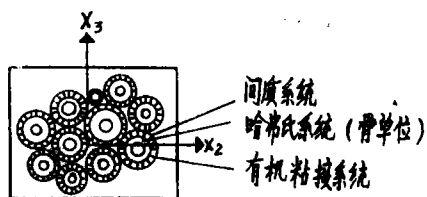


图 1 皮质骨横截面示意图

胶原分子为长链结构，它们排列成称为胶原纤维的三重长螺旋线。羟磷灰石是晶状的各向异性材料。它在胶原纤维上结晶，共同构成坚实的胶原-羟磷灰石纤维。这些纤维排列成平行于骨的轴线的同心板层 (Bloom 和 Fawcett 1962)，这些板层之间的空间由羟磷灰石填充。许多此种同心板层围绕 Havers 管形成一个骨单位。过去认为骨由羟磷灰石纤维构成并用胶原粘结的概念是不适当的，因为

胶原不是各向同性材料，而是方向性很强的材料，羟磷灰石则需要胶原纤维在其上结晶。胶原纤维是粘弹性的 (Fung 1968)，而羟磷灰石晶体是弹性的 (Katz 和 Ukraincik 1971)。由于每个粘弹性胶原纤维埋置在弹性的羟磷灰石晶体里，因而认为骨单位具有弹性性能是合乎逻辑的，但在更恰当模型中，必须考虑骨单位稍具粘弹性性能。

Swedlow 等 (1975) 得到关于骨单位结构的清晰的电子显微镜照片。Yoon 和 Katz (1976) 证明这样的结构可考虑为横向各向同性的。

间质系统也由板层组成，然而，这里的板层不是同心的，它们具有不同的大小和形状。宏观上可认为间质系统类似于变截面的纤维。它们在骨中的相对体积约为骨单位中的相对体积的 0.25 倍。

有机粘结材料已知是粘弹性的，由粘多糖构成；其精确的力学性质至今还不知道，因为它在分离过程中会分解。这些性质的量级可由其他组织分离而得到透明质酸的已知性质估计。骨中基体的相对体积很小，小于 1%。

以往将骨描述为复合材料的著作由 Lakes 和 Katz (1974) 给出。现有的模型均未考虑骨的如近几年实验所描述的那样的实际详细结构。最后这种模型，本文已列表。Katz 和 Ukrainci (1972) 考虑到骨的复合结构，但未顾及其粘弹性性能，