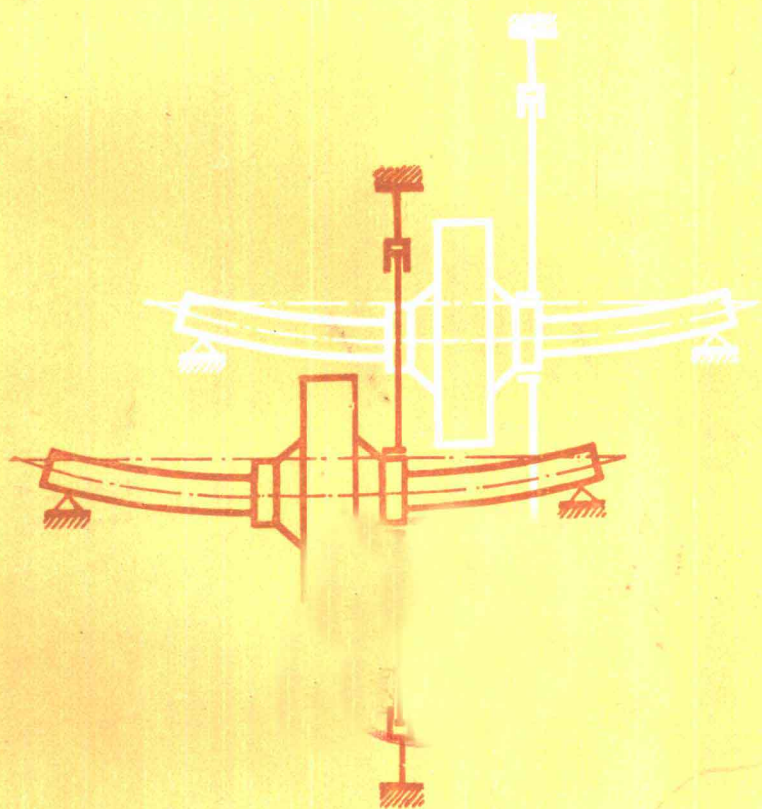


转子动力学导论

[联邦德国] R.伽西 著
H.菲茨耐



机械工业出版社

转子动力学导论

(联邦德国) R.伽 西 著
H.菲茨耐



056926

本书论述的内容是关于旋转轴的弯曲振动特性,其中讨论了有关转子结构上的重要问题。如固有频率、临界转速、共振过程、稳定与不稳定的转速范围。

书中分析了下列各种影响:转子不平衡量和重量、弹性支承、外部和内部的阻尼、滑动轴承(特别是动压轴承)、回转效应、非圆的轴截面、蒸汽激励、磁力以及联轴节、滚动轴承和轴对中的影响等。

为了使每种现象能清楚地和利用较少的数学计算来说明,分析中采用了一种最简单而可用的模型——拉伐尔轴——作为基础。书中也讨论了避免或抑制这类转子振动的措施。

本书带有少量的例题和详细的文献索引,其中也包括了一些最近的文献。

本书适用于有关专业的高等院校师生和实际工作中的工程技术人员。

**Rotordynamik
Eine Einführung**

R. Gersch

H. Pfützner

Springer-Verlag

Berlin 1975

• • •

转子动力学导论

(联邦德国) R. 伽西 著
H. 菲茨耐

周仁睦 译

蔡家宝 校

•

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

•

开本 850×1168 1/32·印张 5 7/8·字数 152 千字

1986 年 12 月北京第一版·1986 年 12 月北京第一次印刷

印数 0,001—1,730·定价 1.75 元

•

统一书号: 15033·6452

译 者 的 话

这是一本非常好的基础理论书籍。特别对于一个初学者是很适用的，即使对于一个多年从事转子动力学的工作者也是很有帮助的。

本书的特点是通过一个最简单的转子模型——拉伐尔转子（即单轮盘的对称转子），对转子动力学中的各种问题进行了分析（例如临界转速、共振通过、稳定性以及内外阻尼、支承油膜、陀螺效应、非圆轴等的影响）。由于转子模型简单，所以利用一般的高等数学就可以建立运动微分方程，直至得到完整的分析解，由此从数学上论证了各种物理现象，使读者得到一个完整而清晰的概念。然而本书毕竟是一个寻论，不可能把工程中的实用方法都包括进去，但是它却定性地对解决工程问题作了指导。书后的例题和文献索引是很有使用价值的。

作者的写作水平很高，语言精练，层次清楚，深入浅出。为译出原著的风格，译者尽了最大努力，但受水平所限，难免出现不当之处，望读者不吝指正。

本书的专业术语汉德对照部份由章开盛同志校订，全书由西北工业大学蔡泰信同志校订，为此特意致谢。

译者

原 序

几十年前，当机械动力学的研究主要还是活塞机械时，其中一个重点已转向具有单一旋转体的机械，如透平机械和电机，这当然也涉及到燃气透平、透平泵、透平压缩机和电动机的应用范围，也即过去主要依靠活塞机械的领域。此外由于设法提高转速来降低单位功率重量，因而出现了过去实际上尚无意义的运转稳定性问题。所以最近几年来这个领域中的研究加强了。

在弯曲弹性转子动力学导论一书中，分析研究了一个最简单的转子模型上大量有趣的，甚至常常使人惊讶的现象。我们只局限于一个拉伐尔转子（装有一个轮盘的弹性轴）的讨论，在这种转子上已可以指出最重要的现象。由于自由度较少，故在大多数情况下可得到运动方程的分析解。

本书适用于高等院校的师生和实际工作中的工程师。我们希望，由于只使用了少量的高等数学而能使初学者较容易理解。我们欢迎读者指出本书的缺点和提出改进意见。

我们感谢对本书给予了支持的所有同仁，特别是 Hildegard Buhler, Christa Jahn, Erika Schemmerling 和 Jutta Schramm 女士们的辛勤誊写工作和 Christine Rachfahl 对插图的精心描绘。还要感谢工学博士 Jürgen Drechsler 先生在改善论述上作出了重要指导，以及工学士 Christian Fröhlich 先生与工学士 Richard Günther 先生对许多图表的计算。特别要感谢 Günther 先生对印刷上错误与缺陷的订正。最后还要感谢 Springer 出版社的良好装帧和愉快而融洽的合作。

R. 伽西 H. 菲茨耐

柏林 1975年夏季

目 录

第一章 概论	1
1.1 旋转机械的结构	1
1.2 不平衡量激励下刚性和弹性转子的不稳运转	1
1.3 弯曲弹性转轴的最简单例子——拉伐尔转子	6
1.4 关于数学处理	7
第二章 刚性支承上的无阻尼拉伐尔转子	8
2.1 概述	8
2.2 运动微分方程和它的解。空间静止坐标系中表示方法	9
2.3 复数空间静止坐标系中表示方法	16
2.4 同步旋转坐标系中表示方法	19
第三章 弹性支承上的拉伐尔转子	22
3.1 概述	22
3.2 运动微分方程和它的解	22
3.3 同向旋转与反向旋转	24
第四章 具有内外阻尼的拉伐尔转子	28
4.1 概述	28
4.2 外阻尼	28
4.3 粘弹性材料中的内阻尼	33
4.4 内阻尼与外阻尼	37
4.5 结构阻尼, 其他材料规律	39
第五章 临界转速上与通过共振时的拉伐尔转子性能	42
5.1 概述	42
5.2 临界转速时轴的变形位移	42
5.3 无阻尼转子通过临界转速时的最小驱动力矩	45
5.4 等角加速度通过共振时的最大转子动挠度	46
第六章 稳定性研究, 稳定性准则	49
6.1 概述	49
6.2 系数条件法	51

6.3	对稳定性的霍尔维茨与皮尔赫茨行列式判别准则	53
第七章	滑动轴承上的转子	55
7.1	概述	55
7.2	滑动轴承性能	56
7.3	刚性转子的运动方程和稳定极限, 极限转速	60
7.4	弹性转子的运动方程	63
7.5	弹性转子的稳定极限, 极限转速	64
7.6	稳定图	67
7.7	不平衡激励的弹性转子振动计算	69
7.8	弹性转子的共振曲线	71
7.9	不稳定性的原因	76
第八章	回转效应影响	81
8.1	概述	81
8.2	运动方程	83
8.3	自由的轴振动	88
8.4	不平衡激励的轴振动	91
8.5	反向激励时的弯曲临界转速	96
8.6	回转效应对不等刚度弹性支承上转子的影响	101
第九章	非圆形轴	104
9.1	概述	104
9.2	运动微分方程和它的解	105
9.3	外阻尼的影响	112
第十章	第二类弯曲临界转速	115
10.1	概述	115
10.2	拉伐尔转子在不均匀旋转中的运动方程	116
10.3	由转矩波动和重量影响引起的不均匀的轴旋转	119
第十一章	其他因素对弯曲弹性转子动力性能的影响	124
11.1	概述	124
11.2	磁力	124
11.3	联轴节影响	125
11.4	翘曲的轴	127
11.5	对中误差	128
11.6	滚动轴承影响	128

11.7	蒸汽激励	130
11.8	利用正交性支承的稳定处理	131
11.9	齿轮箱	133
11.10	表列总览.....	133
第十二章	实际应用中的提示.....	134
12.1	运转平稳的评定	134
12.2	运转不平稳原因的分析	136
12.3	消除振动的措施	137
例题		141
参考文献		165
专业术语汉德对照		172

第一章 概 论

1.1 旋转机械的结构

旋转机械的基本结构可以先从下面两个例子给予说明。图1.1为一个大型感应电机的解体图。由旋转磁力带动的闭路转子，往往是由滚动轴承支承，或是由滑动轴承支承。右边表示了滚动轴承改为滑动轴承的结构。轴承套从左面和右面固定在轴承座板上，由此将重力传递到机壳的座架上。大型机器的机壳固定在基础上。小型的机器就不需要基础。

图1.2是单级径向泵，转子是由从里向外流向的转轮与一根细长轴组成。轴的两端用滚珠轴承支承。旋转轴与机壳之间的密封采用填料套，填料与轴接触，由此阻止液体外流。

从以上二个例子已经可以对旋转机械的基本结构有所认识，旋转机械就是指电机(电动机、发电机、整流机、调相机)，流体机械(蒸汽透平、燃气透平、透平泵、透平压缩机、鼓风机)或其他设备，例如离心机等。他们的基本部件始终是：

- 转子(转鼓式转子、轮盘式转子、星状转子)，
- 机壳，在电机中称为定子，
- 轴承(滑动、滚动、气体、磁力轴承和静压轴承等)，
- 轴承座板或轴承座箱，
- 转轴与机壳之间的密封(接触式填料或非接触的迷宫式轴封)，这在机壳内外有压差时使用。

如果二台或更多的机器相连接，例如图1.3中驱动水力透平与被驱动的发电机相连，就形成一个轴系，其中把联轴节作为连接部件(需要时还有齿轮箱)。有时为了使结构紧凑，各转子也可相互套装起来，例如航空发动机，图1.4。

1.2 不平衡量激励下刚性和弹性转子的不平衡运转

弯曲刚性转子：一个回转对称的转子，初看起来动力性能是

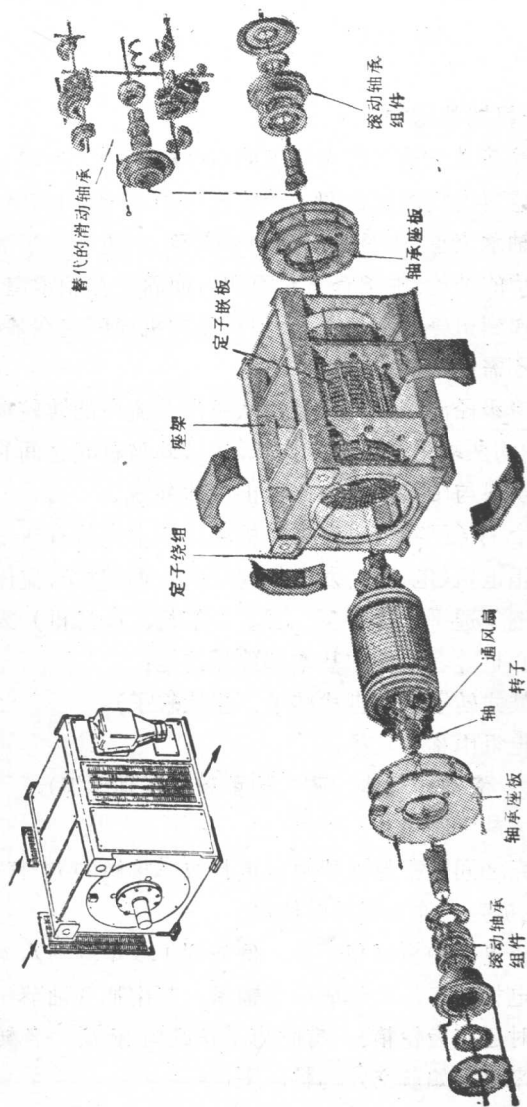


图1.1 感应电机结构 (根据西门子厂图纸)

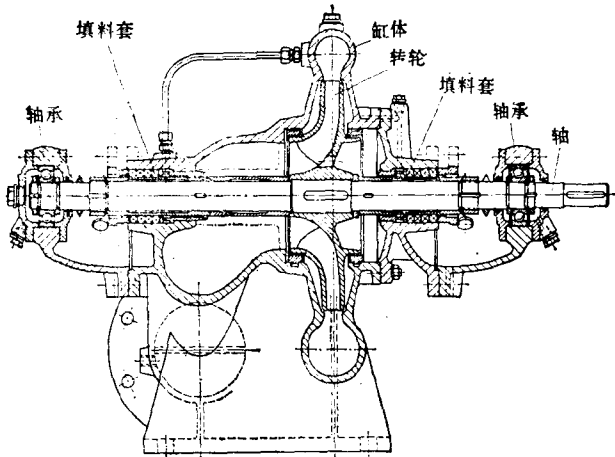


图1.2 单级径向泵纵剖图

没有问题的。若与活塞机械各个传动部件（活塞与连杆）的非常复杂的运动相比，刚性的透平机械或电机转子的运动状态确实是十分简单的。旋转力矩基本上是平衡的，也就是说，据本没有或只有很小的转矩波动。由旋转产生的离心力也相互平衡。有时由于制造精度不够将使质量分布不完全旋转对称。由重心 S 偏移产生的离心力大小为 $F = \varepsilon m \Omega^2$ ，它将引起旋转的支承力 F_i 和 F_r ，见图1.5。这些力的大小随转速，也就是随角速度 Ω 的平方而增大。支承力从静止的观察者看来是周期性的。它们就是振动的原因，由此，除了噪音以外人们还可以从振动来判断机器是否在运转。离心力以及支承力可以用转子的任意两个平面上加适当的校正量来消除。这个过程称为动平衡。关于弯曲刚性转子动力学实

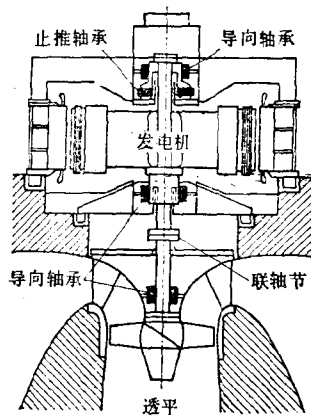


图1.3 水力透平发电机组，垂直轴系

② 转子的角速度 Ω 是与转速成正比的，后面也称为旋转频率，旋转速度或转速。

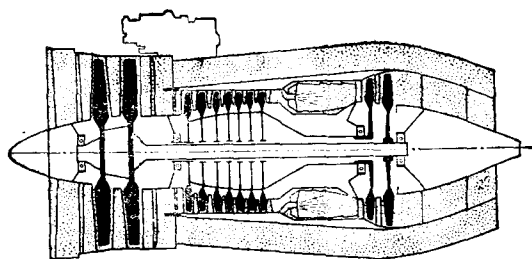


图1.4 航空发动机

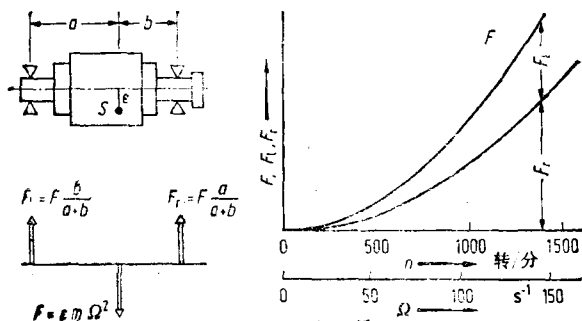


图1.5 不平衡的刚性转子中旋转离心力 F 与支承反力 F_i, F_r (m 是转子质量, e 是偏心距)

实际上已不再多讨论了。

弯曲弹性转子：当转速上升时，离心力也随之增大。对应于任意一点，必须考虑转子在离心力作用下的弹性变形 ρ_w ，因为它将产生附加离心力。于是总离心力为

$$F = (\varepsilon + \rho_w) m \Omega^2 \quad (1.1)$$

其中假定，轴是在重心的偏移方向弯曲出去的。第二章要详细分析，并将说明这个假设在某些情况下是正确的。如果转子的弹性弯曲明显地大于其偏心量，就称为弯曲弹性转子。本书讨论的也就是这种转子。如果在装有一个轮盘的转子上建立起力的平衡关系，就能对弯曲弹性转子的性能有所了解。

轴的弹性恢复力 $c\rho_w$ (c 为弯曲刚度)与方程(1.1)的离心力相平衡，见图1.6由

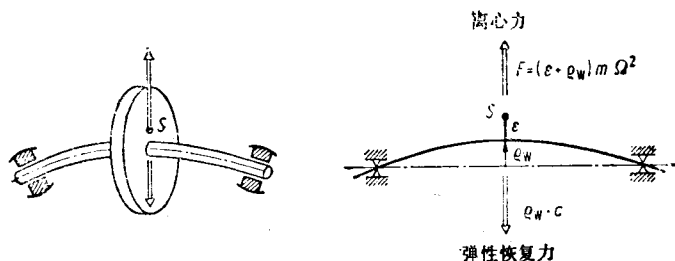


图1.6 不平衡量激发的轴振动中力的平衡关系

$$c\rho_w = F = (\varepsilon + \rho_w)m\Omega^2 \quad (1.2)$$

得到轴的变形为

$$\rho_w = \varepsilon \frac{(\Omega/\omega)^2}{1 - (\Omega/\omega)^2} \quad (1.3)$$

其中 $\omega = \sqrt{c/m}$ 。这 ω 数值表示了一个振动子的固有圆频率，它由轮盘质量 m 和轴弹性刚度 c 所组成。它基本上表明了转子的性能。

低速时 ($\Omega < 0.5\omega$) 轴弯曲主要正比于离心力分量 $\varepsilon m\Omega^2$ 。因为此时方程 (1.1) 的 $\rho_w m\Omega^2$ 分量还很小，如图 1.7 (左边)。当 $\Omega = \sqrt{1/2}\omega$ 时轴变形的大小就恰好等于偏心距 ε 。

当 $\Omega = \omega$ 时为临界转速，此时轴的动挠度将为无穷大。只要有足够大的角加速度，就可以很快地通过临界转速，因为转子将没有时间达到如稳定运转时那样大的轴动挠度，超过临界转速后，就进入轴动挠度很小的区域。在很高的转速中轴动挠度 ρ_w 趋近于偏心距 ε 的数值：其重心 S 落在旋转轴线上，也就是所谓转子质量“自对中”。

图 1.7 (右边) 表示出离心力 (或与它成正比的支承力) 的曲线。开始离心力如刚性转子随转速的平方增大，而且以后将增大得很大。在临界转速上 (稳定) 运转时，理论上它将达到无穷大。但是通过临界转速以后，离心力就很快地减小了。因为随着转速的增高重心越来越靠近旋转轴线，离心力就趋近于数值 εc 。

在工程中，低于临界转速运转的转子称为下临界转子，超过

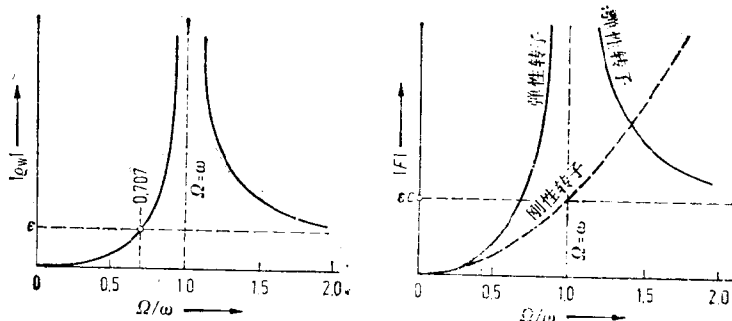


图1.7 弹性转子中的轴动挠度与旋转离心力

临界转速运转的转子称上临界转子。在 $\Omega < \sqrt{1/2} \omega$ 的转速范围内运转的转子称刚性转子，因为在此范围内轴的离心力变形小于偏心距。在较高的转速上运转的转子称弹性转子。

1.3 弯曲弹性转轴的最简单例子——拉伐尔转子

拉伐尔转子^①是由弯曲弹性轴和具有质量的轮盘组成的，本书就局限于对这种转子进行讨论。相对于实际结构说来，这就显得特别简化了，尽管如此，简化模型仍有实用的价值。用这个模型几乎可以对实际中全部的重要现象进行解释和讨论。

图 1.8 所示的蒸汽透平转子几乎不可能简化成这样简单的模型。一种可行的模化就如示意图所示，转子由无质量的弯曲弹性轴与具有质量的轮盘组成。对这种旋转轴的不平衡量影响进行彻底分析可得到下列性能：

轴本身具有很多的固有频率 ω_n ，且最低的频率处于运转范围以下。这些固有频率是临界转速，轴弯曲在临界转速上将达到无穷大，所以不允许在临界转速上运转。图 1.9 表示了转子上某点 x_n 的弯曲 ρ_w 与转速 Ω 的关系。

相对于上述拉伐尔转子的简单模型还出现了较多的弯曲临界转速（固有频率）；但基本上没有什么新现象。“旋转频率 Ω 不能与转子固有频率 ω_n 相重合”的规则仍应遵守。拉伐尔转子所得到

^① G.P.拉伐尔(Laval)1845~1913年，叶轮转子结构的单级冲动透平发明者，此透平以他命名。

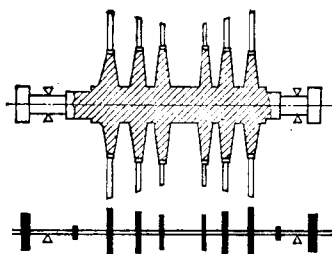


图1.8 一个蒸汽透平的模化处理

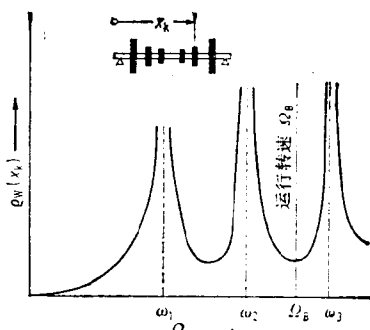


图1.9 x_k 位置上轴动挠度 ϱ_W 与转速 Ω 的关系

的结果用到复杂转子上时，往往可以使情况更为清晰。

1.4 关于数学处理

本书中所讨论的转子动力学问题都采用线性微分方程，或微分方程组。这种线性化处理的方法对于几乎所有遇到的实际问题都作出了令人满意的解释。这是因为转子上所有的作用力几乎都是线性的或可以线性化的。非线性的现象只是在大振动中才出现，但是这种现象已为机器所不许可。

线性微分方程组的通解可以由齐次解与一个特解组成。首先可提供固有频率，并推得弯曲临界转速。其次是由齐次解判断振动系统的稳定性或不稳定性。本书将举例说明，由于内部阻尼力、非圆截面以及由于动压轴承的油膜力可能出现转子的自激弯曲振动。非齐次解是针对运动微分方程中的周期的或有时是常数的干涉项。周期的激励一般是发生在轴的旋转周期中，例如不平衡量的激励，或以多倍的轴旋转频率出现。它在一定的转速下引起共振现象。除了作为最重要激励源的不平衡激励外，例如联轴节缺陷或滚动轴承等也会引起共振。对于水平安装的非圆轴，以及转子的自重也要引起一个附加的弯曲临界转速。图 11.16 的表中展示了概要情况，其中说明了各种振动激励机理的作用，以及书中何章何节对此进行了讨论。

第二章 刚性支承上的无阻尼拉伐尔转子

2.1 概述

一个弯曲弹性转子的最简单模型由一个有质量的轮盘和一根弹性轴组成，但是这根轴被设想成无质量的圆轴。以下这种转子模型被称为拉伐尔转子。

在本章中假设支承相对于轴来说是刚性的，此外，阻尼力可以忽略不计。这二个假设对于在气体介质中运转的用滚动轴承支承的转子说来，是十分合适的，例如电机、透平压缩机、蒸汽和燃气透平等，只要它们不使用滑动轴承都是合适的。

另外还假设，轴在轮盘位置承受横向力时，轮盘不产生角偏转，见图 2.2。这意味着这种假设的普遍性受到很大限制。这个假设在第八章中将放弃，但要指出，本章所得到的结果与实际情况相当吻合，因为角偏转的影响一般说来很小。

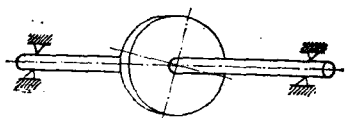


图2.1 刚性支承上的拉伐尔转子

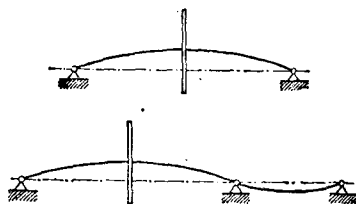


图2.2 轮盘的平移动挠度

对这种简单模型分析表明，它存在一个**临界转速**，在此转速上由于旋转的不平衡量以转子的固有频率同步激励转子，以致转子的很小质量偏心会引起很大的轴动挠度。

在叙述中，首先采用空间静止笛卡尔坐标系，然后合并为复数，最后使用旋转坐标系。每种表示方法都有某些优缺点。在以后章节总是选择使运动微分方程最容易建立和求解，使结果一目了然的坐标系。

2.2 运动微分方程和它的解。空间静止坐标系中表示方法

我们采用空间静止笛卡尔坐标系 (x, y, z) 时, 使 x 轴表示轴线方向, 其他二根轴线位于轮盘的中心平面上, 如图2.3。坐标系的原点 O 位于转子尚无动挠度时的轴截面形心点 W 上, 这就是说, 位于支承中心的连接线上, 其中假设由自重所引起的静挠度忽略不计 $\ominus$ 。

轴截面形心 W 之坐标为 z_w 和 y_w 。对于没有弯曲的轴来说, 它是与坐标原点 O 重合的。

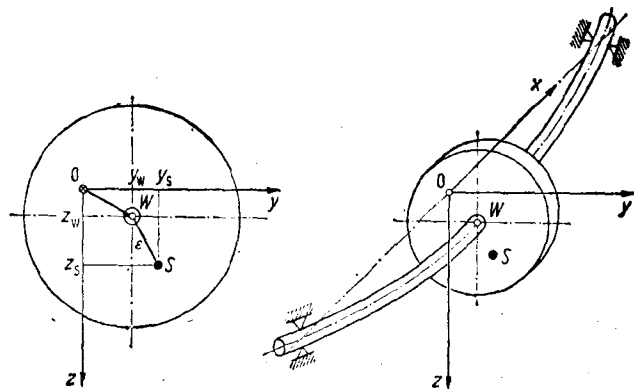


图2.3 在空间静止坐标系中有动挠度的轴

轮盘重心 S 的坐标为 z_s 和 y_s , 距轴截面形心 W 有一个固定的间距 ϵ , 称为偏心距。这个偏心是由于轮盘材质的不均匀性, 或轮盘键的不对称性引起, 在透平机械中还可能由叶片安装的不对称性引起。不仅偏心距 ϵ , 而且转子的动挠度与轮盘尺寸相比都是非常小的。为了清楚起见, 在图 2.3 中它们被特别夸大地表示出来。偏心距 ϵ 与轮盘质量 m 之乘积称为不平衡量

$$U = m\epsilon \quad (2.1)$$

在平面上运动的轮盘具有三个自由度, 其中二个是 y 和 z 方向的位移, 它用重心 S 或轴截面形心 W 的坐标来表示, 还有一个是转动角 φ 。 φ 是 z 轴与轮盘上固定的任意基准方向之间的夹

$\ominus$ 自重影响见2.3节。