

试验机丛书

# 转子平衡技术与 平衡机

王汉英 张再实 徐锡林 编



机械工业出版社

本书系《试验机丛书》之一，该书主要介绍刚性转子和挠性转子平衡的基本概念、平衡方法、刚性转子许用不平衡量的确定方法和平衡精度（品质）等级、平衡机的结构和工作原理、旋转机械的现场平衡等。

本书可供从事各种旋转机械平衡工作及与其有关的工人和技术人员使用，也可供高等院校有关专业师生参考。

试验机丛书

## 转子平衡技术与平衡机

王汉英 张再实 徐锡林 编

责任编辑：高金生

封面设计：田淑文

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（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 787×1092 1/32·印张 11 1/4·字数 248 千字

1988年4月北京第一版·1988年4月北京第一次印刷

印数 0,001—02,560·定价：2.60 元

ISBN 7-111-00448-5/TH·78

## 前 言

试验机是在各种条件、环境下测定金属材料、非金属材料、机械零件、工程结构等的机械性能、工艺性能、内部缺陷和校验旋转零部件动态不平衡量的仪器。在研究探索新材料、新工艺、新技术和新结构的过程中，试验机是一种不可缺少的重要测试仪器。它广泛应用于机械、冶金、石油、化工、建筑、航空、造船、交通运输等工业部门及大专院校等，对有效使用材料、改进工艺、提高产品质量、降低成本、保证产品安全可靠等都具有重要作用。

近年来，我国试验机及其试验测试技术水平都取得了较快的发展，从事这方面工作的人员也大量增多，为了适应新形势发展的需要，帮助有关人员了解和掌握试验机的基本知识，我们组织编写了这套《试验机丛书》。

本丛书预定分十一分册，其中有：《金属材料试验机》、《非金属材料试验机》、《硬度计及其应用》、《试验机的负荷与位移测量系统》、《试验机的电液伺服系统》、《试验机的环境模拟装置》、《振动台及振动试验》、《转子平衡技术与平衡机》、《超声无损检测仪》、《射线探伤机》、《电磁探伤机》，将陆续出版。

本丛书在文字叙述上力求深入浅出、简明易懂，在内容上重点阐述各种试验机的原理、结构、用途，并扼要地介绍试验机的使用、试验方法、维护要点以及发展趋势等。

这套丛书是在中国仪器仪表学会领导下，在有关高等院

校、科研单位和工厂的大力支持下，由试验机学会组织编写的。很多同志为我们收集和提供了丰富的资料，并在编写和审稿过程中提出了很多宝贵意见，在此表示衷心感谢。

本书共分四章，第一章刚性转子的平衡，由机械工业部长春试验机研究所王汉英工程师编写；第二章平衡机，由王汉英和张再实工程师共同编写；第三章挠性（柔性）转子的平衡，由上海交通大学精密仪器系徐锡林讲师编写；第四章现场平衡，由机械工业部长春试验机研究所张再实工程师编写。全书由王汉英工程师主编。

本书由清华大学精密仪器系严普强教授主审。

由于我们的水平所限，书中不当之处甚至错误在所难免，欢迎广大读者批评指正。

# 目 录

前言	
绪论 .....	1
第一章 刚性转子的平衡 .....	4
第一节 刚性转子的不平衡状态 .....	4
一、转子及其不平衡的概念 .....	4
二、转子产生不平衡的原因 .....	7
三、刚性转子的不平衡状态 .....	7
四、转子不平衡状态与转子质量分布特性间的关系 .....	11
五、转子中心主惯性轴及与转子不平衡状态的关系 .....	17
六、转子不平衡的表示 .....	22
七、支承动载荷计算举例 .....	25
第二节 刚性转子的许用不平衡量及其平衡精度 (品质)等级 .....	30
一、刚性转子许用不平衡量的确定方法 .....	30
二、刚性转子平衡精度(品质)等级 .....	35
第三节 刚性转子的平衡 .....	53
一、刚性转子的单面平衡 .....	53
二、刚性转子的双面平衡 .....	60
三、刚性转子的多面平衡 .....	61
四、曲轴的多面平衡 .....	62
第二章 平衡机 .....	74
第一节 概述 .....	74
一、平衡机的发展概况 .....	74
二、关于平衡机的分类 .....	76
三、我国动平衡机的分类;命名与型号 .....	79

第二节 平衡机的工作原理 .....	81
一、静平衡机的工作原理 .....	81
二、单面(离心力式)平衡机的工作原理 .....	86
三、动平衡机(双面)的工作原理 .....	87
第三节 动平衡机的主要组成部分 .....	93
一、动平衡机的支承系统 .....	94
二、动平衡机的驱动系统 .....	120
三、动平衡机的测量指示系统 .....	126
第四节 平衡机产品的主要类型和性能 .....	184
一、通用平衡机 .....	184
二、专用平衡机 .....	190
三、动平衡自动生产线 .....	196
四、国外生产的平衡机 .....	201
第五节 平衡机的调试与校验 .....	205
一、平衡机的调试 .....	205
二、平衡机的校验 .....	208
第三章 挠性(柔性)转子的平衡 .....	227
第一节 概述 .....	227
第二节 挠性(柔性)转子平衡的理论基础 .....	230
一、梁的横向自由振动 .....	230
二、不平衡转子的动挠曲变形 .....	236
第三节 挠性(柔性)转子的平衡条件及特点 .....	248
一、挠性(柔性)转子的平衡条件及特点 .....	248
二、挠性(柔性)转子平衡的一般理论 .....	252
三、柔性转子的平衡目的和要求 .....	255
第四节 挠性(柔性)转子的平衡方法 .....	256
一、振型平衡法 .....	256
二、刚性转子和振型平衡组合法 .....	262
三、影响系数矩阵平衡法 .....	268
第五节 转子的分类及其平衡方法 .....	280

一、转子的分类 .....	280
二、各类转子的平衡方法 .....	283
第六节 挠性(柔性)转子的平衡标准 .....	288
一、以转子在动平衡机上规定测量点处的振动许用值 为评定标准 .....	289
二、以转子校正平面内的许用剩余不平衡量为评定标准 .....	292
第七节 高速动平衡机简介 .....	295
第四章 现场平衡 .....	300
第一节 概述 .....	300
一、什么是现场平衡 .....	300
二、现场平衡的意义及特点 .....	301
三、机器振动的评定标准 .....	303
四、现场平衡的基本要求 .....	311
第二节 现场平衡的基本方法 .....	312
一、一次试验法 .....	312
二、三点法 .....	313
三、静偶分量分离法 .....	314
四、试重周移法 .....	321
第三节 现场平衡用的仪器 .....	324
一、现场平衡用仪器的主要特性 .....	324
二、常用的相角测量装置 .....	325
三、常用的现场平衡仪 .....	327
第四节 现场平衡实例 .....	337
一、盘类零件的平衡 .....	337
二、汽轮机-发电机组的平衡 .....	339
三、大型轴系的现场动平衡 .....	342
参考文献 .....	352

## 绪 论

各类机器设备、交通工具、仪表装置等的振动是一种常见的现象。除了一些利用振动工作的机器外，对于一般的机器来说，振动是有害的。它将使机器的零部件承受附加的动载荷，明显的加速轴承、轴颈的磨损，影响机器的工作性能，降低机器的精度，甚至使机器过早的损坏。汽车、船舶、飞机等发动机的振动，除使乘坐者和驾驶员感到不舒服和容易疲劳之外，还会影响行驶安全。

机器的振动不但影响本身的正常工作，还可能通过地基的振动传播，影响其他机器的工作或对建筑产生不良的影响。此外，振动又是产生噪声的根源，对操作者或邻近的其他人员在生理上产生不良影响。因此，总是想尽各种方法消除或限制机器的振动。

现代机器正向高速、高效率、高精度和大型化发展，创造舒适的工作条件、抑制噪声、节约能源都已提到日程上来。因此，限制和减小各种机器的振动就愈加显得重要。

然而，造成机器振动的原因是多种多样的。因此，消除或限制机器振动的方法也各不相同。但是，使旋转机械产生振动的主要原因之一是由于转子不平衡质量的惯性力或惯性力矩所造成的。由于不平衡原因所引起的机械振动约占24%<sup>[1]</sup>，对于高速旋转机械，由于不平衡原因引起的振动更为显著。不平衡惯性离心力与机器转速平方成正比，容易被检测，也容易采取消除措施。因此，消除或减小机器振动



首先考虑的主要方法是对转子进行平衡，消除或限制机器旋转零部件或往复机构的不平衡惯性力，以使机器的振动限制在允许的范围內。

所谓平衡即是根据转子-支承系统的动力学特性，并通过测量转子-支承系统有关测点振动与转速同频分量的幅值大小和相位信息来判断不平衡大小和位置，以便采取措施进行平衡的一门技术。它包括对旋转机械、部件、平面或空间机构的平衡，也包括整机和机组的平衡。这里既包括有关平衡基本原理的探讨，又包括平衡方法、平衡工艺及各种平衡机、平衡仪的设计和制造问题。同时还要注意把激光加工、电子计算机等各种新技术引入平衡技术中来，以使动平衡工作更为完善和高效。另外，还应该指出，平衡不单纯是工艺问题，而是从机器设计开始就应该予以考虑和研究的问题。如设计时应考虑转子的平衡精度要求、校正平面的位置和数量、转子校正平面上的许用不平衡量大小及校正方法等。必要时，还应设计出校正重块的大小、形状和安装方法。如果机器设计时对平衡问题没有予以考虑，平衡时可能会出现各种困难。因此，平衡问题贯穿机器设计、制造和检修的全过程，是机器设计、制造中很重要的一门技术。

平衡技术的发展和平衡机的生产是随着旋转机器的制造和使用提出来的，并且随着电动机、发电机、汽轮机等的出现，且转速越来越高而变得更为重要。旋转机器出现的初期，由于机器的转速低，平衡精度要求不高，所以初期阶段也只需要对转子进行静平衡，使用的各种装置也属于静平衡机一类。随着转子平衡精度要求的不断提高，只对转子进行静平衡已满足不了工业生产的实际需要，人们才对动平衡技术发生浓厚的兴趣，动平衡机的研制也就提到日程上来了。

50年代初期，我国某些电机厂就开始使用进口的动平衡机对电机转子进行动平衡。1954年开始生产火花式动平衡机。1956年开始生产陀螺仪，一些高等院校和研究部门开始从事陀螺转子平衡理论与实践方面的研究，并自行设计制造陀螺平衡机。到60年代中期，我国某些试验机厂已把闪光式动平衡机作为正式产品生产，国内许多单位已开始使用国产平衡机进行平衡工作。

目前，我国能平衡小到克计，大到数百吨的转子，并能自行设计和制造200 t 高速动平衡机。曲轴自动平衡生产线已投产使用；激光自动去重陀螺平衡机已研制成功，并且解决了微型陀螺精密平衡和人造卫星的平衡问题。通用软、硬支承动平衡机已开始系列生产。全国已建成数个大型高速动平衡与超速实验室。有关高等院校和研究所在转子动力学、柔性转子平衡理论研究及试验方面正在广泛开展，并能够进行大型发电机组轴系的现场平衡。这些，都标志着我国在平衡理论、平衡实践和平衡机设计制造方面都取得了很大成绩，并推动了有关行业的发展。

# 第一章 刚性转子的平衡

## 第一节 刚性转子的不平衡状态

### 一、转子及其不平衡的概念

在各种机器、仪器、设备和交通工具中旋转零部件是最常见的，并且人们已习惯地把一些旋转部件称为转子。例如电机转子、陀螺转子、水泵转子、汽轮机和燃汽轮机转子等。对于各种曲轴、汽车的传动轴、炮弹、卫星体，特别是飞轮和叶轮等还没有形成这一习惯叫法。但是，在平衡技术中“转子”是指“能够旋转的物体”的总称，一般带有轴颈。但“转子”也可泛指不带轴颈的各种旋转体，例如刹车鼓、飞轮和圆盘等。被平衡的转子可以是机器的零件，例如机床的主轴、曲轴、飞轮和叶轮等。也可以是装配好的部件，例如电机转子、陀螺转子、汽轮机转子等。

根据转子的工作状态和力学特性、从平衡的观点出发，通常把转子分为两类，即刚性转子和柔性转子。一般来说，凡是工作转速远远低于转子的一阶弯曲临界转速的转子视为刚性转子；而把工作转速接近或超过转子一阶弯曲临界转速的转子视为柔性转子。

顾名思义，所谓刚性转子是把转子视为刚体，认为转子在工作和平衡时，都不产生弹性变形。实际上，任何转子都不可能是绝对刚性的，转子在不平衡离心力的作用下（有时也要考虑其他外载荷的作用）都要产生一定的弹性变形。众

所周知，在静载荷作用下，任何零件产生单位弹性变形所需加的静力称为零件的静刚度。与此相应、常把转子产生单位动挠度（单面）时所需加的动载荷称为转子的动刚度。因此，所谓刚性转子是指动刚度相当大，转子在不平衡离心力的作用下所产生的动挠度（弹性变形）很小，在转子工作和平衡过程中可忽略不计的转子。

在国际标准化组织制定的“平衡词汇”标准 ISO1925—1981 和我国“试验机名词术语” ZBY033—82 中，定义刚性转子为“可以在一个或任意选定的两个校正平面上，以低于转子工作转速的任意转速进行平衡校正，且校正之后，在直至最高工作转速的任意转速和接近实际的工作条件下，其不平衡量均不明显地超过所规定的平衡要求”的转子，称为刚性转子。

凡不能满足刚性转子定义的转子称为柔性转子，由于柔性转子的动刚度较小，转子在平衡时所产生的弹性变形较大，已达到了不允许忽视的程度。因此，柔性转子平衡时必须考虑弹性变形的影响。

如果说刚性转子可以在一个或任意选定的两个校正平面上，以低于工作转速的任意转速进行平衡的话。那么，一般来说，柔性转子就需要在多于两个校正平面上进行平衡。但是，有些特殊类型的柔性转子也可以在两个校正平面上进行平衡，有关柔性转子平衡方法问题在第三章再详细介绍。在此值得提出的是：对于超过临界转速的转子，很明显必须作为柔性转子对待。而对于低于临界转速的转子如何将它们区别为刚性转子或柔性转子呢？一般来讲，工作转速非常接近转子临界转速的转子是不多的，不是超过临界转速，就是远低于临界转速。经验证明，当转子的工作转速与临界转速的

比 $\frac{\omega}{\omega_0} \geq 0.5$ 时，转子的弹性变形对转子的不平衡状态将产生明显的影响，因此平衡时必须考虑转子弹性变形的影响。

这里还应说明一点，某些刚性转子（如曲轴），由于结构或平衡工艺的特殊要求，必须在多平面上进行平衡校正。我们说刚性转子可以在任选的两个校正平面进行平衡校正，但不是说刚性转子必须在两个校正平面进行平衡校正。

转子是否平衡是由转子质量相对于旋转轴的分布状态所决定的。众所周知，当转子旋转时，转子上不在旋转轴线上的每个质点都产生一个离心力。如果转子上这些离心力对于旋转轴线是对称分布的，亦即转子质量是轴对称分布的，则这些离心力彼此互相平衡，这时转子支承上将只受转子自重和外载荷的作用，而没有不平衡离心力所引起的动载荷，因此支承系统也不应有不平衡离心力所引起的振动。这时，我们称转子是平衡的。如果转子旋转时，不平衡离心力作用到转子支承上，称该转子是不平衡的。虽然转子是否平衡是由转子质量相对旋转轴线的分布状态所决定的。但是，转子的不平衡往往只能根据转子的支承是否振动或转子支承是否承受附加动载荷才能判断。这里也应说明，造成旋转机械支承系统振动的原因是很多的，诸如润滑不良、轴承的磨损或不清洁、联接部分松动等。而转子不平衡离心力所引起的振动或支承附加动载荷与其他原因引起的振动或动载荷不同，它具有固有的特征，即动载荷与转速平方成正比，频率与转速同频等。并且由于转子质量分布特性不同，支承所受动载荷也不同。因此，可根据支承的振动或支承所受动载荷的不同确定转子的不平衡状态。

## 二、转子产生不平衡的原因

转子产生不平衡的原因是很多的，但大致可归结为以下四种基本原因：

### 1. 转子结构的不对称

例如曲轴等。

### 2. 由于原材料或毛坯的缺陷

例如，原材料密度不均匀，铸造毛坯有气孔、砂眼、缩孔和组织疏松缺陷；锻件有重皮和夹杂物；焊接结构的焊缝不均匀等。

### 3. 由于加工和装配有误差

例如，转子与轴颈轴线的不同轴；装配时径向间隙不均匀或不同轴；联接螺钉拧紧程度不同或由于热压配合和焊接所引起的挠曲变形等。

### 4. 在机器运转过程中所产生的不平衡

例如，砂轮、泵、螺旋桨推进器、离心机分离钵等工作时的不均匀磨损；由于运转过程中温度变化而产生的变形；由于运转过程中离心力所引起的零件间的微小移动或弹性变形等。

因此，在机器设计、制造、安装和使用过程中应尽量减少转子产生不平衡的因素，避免转子出现过大的不平衡而造成机器振动。

## 三、刚性转子的不平衡状态

由于转子的质量分布特性不同，即转子的不平衡状态不同，转子旋转时引起支承振动形式和动载荷也不同。

对于图1-1所示简单的单圆盘转子，假设此转子的全部质量都集中在转子的圆盘部分，且位于同一旋转平面内，但由于制造、安装误差和质量不均匀等因素使转子重心偏离旋

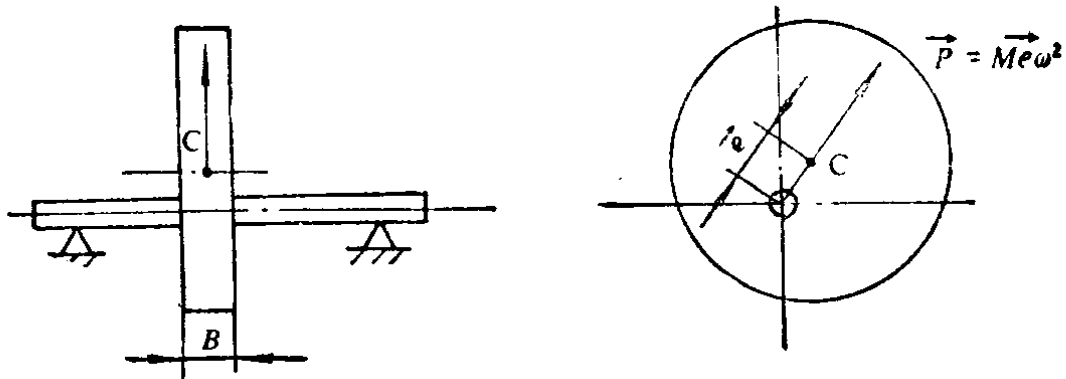


图1-1 单圆盘转子的静不平衡

转轴线，其偏心距为  $e$ 。当转子以角速度  $\omega$  等速旋转时所产生的离心力为

$$\vec{P} = M \vec{e} \omega^2 \quad (1-1)$$

离心力  $\vec{P}$  为一矢量，其方向与偏心距  $e$  的方向相同，并以角速度  $\omega$  绕轴线旋转，此离心力作用在转子支承上，使支承系统承受附加动载荷或振动，因此转子是不平衡的，并把此种由于质心偏离旋转轴线所产生的不平衡状态，称为静不平衡。图1-1为单圆盘转子静不平衡示意图。

对于图1-2所示情况，虽然圆盘质心在旋转轴上，但圆盘的质量分布不在同一回转平面内，即转子的旋转轴线与圆盘平面不垂直，其倾斜角为  $\alpha$ 。这样，当转子旋转时，支承也会承受附加动载荷的作用，因而引起振动。这种不平衡相当于在转子圆盘上有两个大小相等的不平衡质量  $m$  分别位于旋转轴的两侧，质量  $m$  的离心力  $P$  形成一个力偶，如图1-2所示，其力偶矩为

$$T = Pd \quad (1-2)$$

因此称此种不平衡状态为力偶不平衡或简称为偶不平衡，图1-2为单圆盘转子偶不平衡状态示意图。

上述静不平衡和偶不平衡状态仅是动不平衡的特殊情

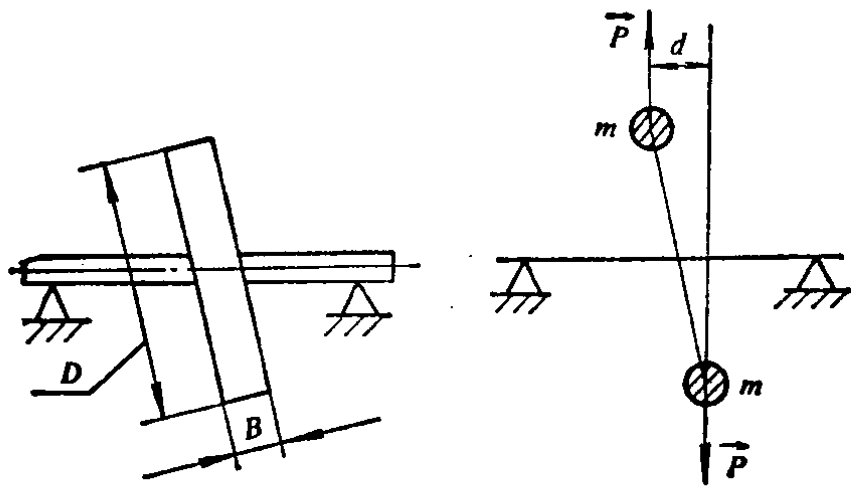


图1-2 单圆盘转子的偶不平衡

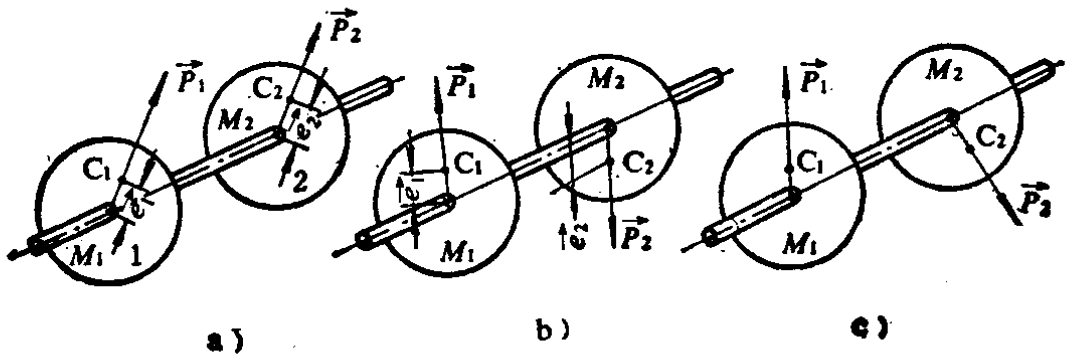


图1-3 双圆盘转子的不平衡状态示意图

a) 静不平衡 b) 偶不平衡 c) 动不平衡

$$M_1 = M_2$$

$$\vec{e}_1 = \vec{e}_2$$

$$M_1 = M_2$$

$$\vec{e}_1 = -\vec{e}_2$$

况，一般来说两种情况都存在，并称之为动不平衡。

对于盘类零件或具有单圆盘的转子，当盘的直径与其厚度的比  $\frac{D}{B} \geq 5$  时，虽然可能出现偶不平衡或动不平衡状态，但一般偶不平衡的影响比较小，可只考虑静不平衡的作用。

图1-3为双圆盘转子各种不平衡状态示意图，如果其中一个或每个圆盘的质心都不在旋转轴上，则转子也是不平衡的。由于两个圆盘质心的相对位置和所产生的离心力的大小不同，其不平衡状态也不同。当两个圆盘质量相同，其偏心距  $e_1 = e_2$ ，且同相位时，转子为静不平衡状态，如图1-3 a 所



示。当两个圆盘的偏心距大小相等，但相位相反时，即两个圆盘质心相位差180度，且离心力的大小相等，则转子为偶不平衡状态，如图1-3 b所示。

如果两个圆盘的质心既不同相位，又不反相位，或两圆盘的质心偏移量不等，则转子为一般动不平衡状态，如图1-3 c所示。对于双圆盘转子，一般都为动不平衡状态。

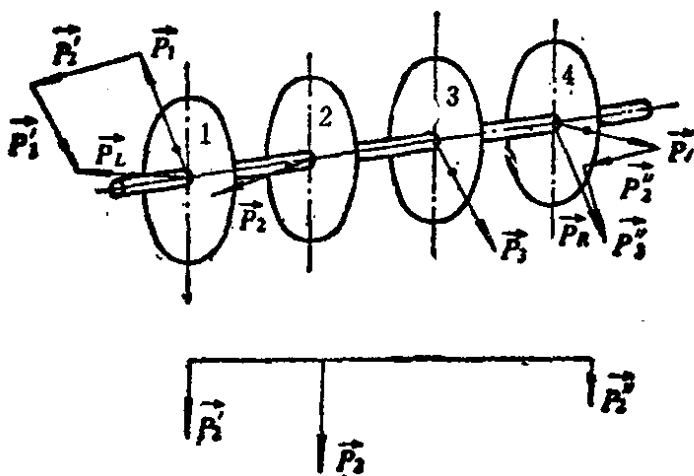


图1-4 多圆盘转子的不平衡简化为等效不平衡的示意图

对于多圆盘转子，可把每个圆盘上的不平衡离心力分解到任选的两个圆盘上。例如，对图1-4所示的带有四个圆盘的转子，把圆盘2和3上的不平衡离心力 $\vec{P}_2$ 和 $\vec{P}_3$ 都分解到1、4圆盘上，其结果分别为 $\vec{P}'_2$ 、 $\vec{P}'_3$ 和 $\vec{P}'_3$ 、 $\vec{P}'_2$ ，在圆盘1上，力 $\vec{P}_1$ 、 $\vec{P}'_2$ 和 $\vec{P}'_3$ 合成为 $\vec{P}_L$ ，在圆盘4上力 $\vec{P}_4$ 、 $\vec{P}'_2$ 和 $\vec{P}'_3$ 合成为 $\vec{P}_R$ 。所以，所有圆盘上的不平衡离心力可用1、4圆盘上的等效力 $\vec{P}_L$ 和 $\vec{P}_R$ 代替。因此，多圆盘转子的不平衡状态与双圆盘情况相同。即 $\vec{P}_L$ 和 $\vec{P}_R$ 方向相同，且合力作用线通过整个转子的质心为静平衡状态；当 $\vec{P}_L = -\vec{P}_R$ 时为偶不平衡状态；当 $\vec{P}_L$ 和 $\vec{P}_R$ 既不同相位又不反相位时为动不平衡状态。图1-4为多圆盘转子不平衡状态，简化为任意选定的二个校正圆盘上等效不平衡量 $\vec{P}_L$ 、 $\vec{P}_R$ 的示意图。

对于轴类转子，可认为转子是由无限多个连续的薄盘所