

动平衡与静平衡

柯列斯尼克著

于尔申译

出版者的話

本書敘述了迴轉物体平衡理論的基本概念，研究靜平衡和動平衡方面所用的機器、裝置及儀器等之構造。

可供機器製造工業部門中的工程技術人員參考。

本書經交通大學朱城教授校過，其中有關電子學部分并經徐俊榮先生校過。

苏联 Н. В. Колесник 著 ‘Статическая и динамическая
балансировка’ (Машгиз 1954 年第一版)

*

*

*

NO. 1841

1958 年 10 月第一版 1958 年 10 月第一版第一次印刷

850 × 1168 ¹/₃₂ 字數 171 千字 印張 6 ¹¹/₁₆ 0,001—2,600 冊

機械工業出版社(北京東交民巷 27 號)出版

機械工業出版社印刷廠印刷 新華書店發行

北京市書刊出版業營業許可証出字第 008 號 定價(10) 1.30 元

序 言

在現代機器特有的高工作速度下，轉動零件的平衡問題非常重要。

如果零件對它原來的轉動軸綫平衡好了，在轉動時所產生的離心力就互相平衡，零件材料只產生內應力，外面看不出來。具有這種零件的機器，工作很安靜；在其他條件相同時，效率比較高，比較經濟。

在高速轉動時，即使未平衡的質量不大，也可能產生非常巨大的不平衡離心力而使軸承受動力載荷，這種載荷照例是有害的；這樣就降低了機器的效率，同時使機器要經常修理和過早損壞。

同時，不平衡離心力是機器振動的主要原因之一。而機器的振動是一種非常有害的現象。

振動降低生產率，對工作人員的健康情況也有害處，時常引起職業病；振動使精密機件生產出廢品，並降低產品質量；振動常常使機器損壞，使油管裂開，使自動調節器失效，因而使機器發生事故，引起嚴重的後果和巨大的物質損失。

我國（蘇聯）宏偉的建設事業，要求大量應用各種新型機器。這些機器工作起來必須經濟而可靠。由於轉變能量的機器的主要部分大多是旋轉零件；所以，非常明顯，機器零件的平衡問題在經濟上非常重要。

不僅在製造新機器時需要平衡零件。由於許多原因，在運用期間，零件極易變得不平衡；因而，在運用機器的地方——例如車站、車間、磨粉廠、輪船等等地方——也需要平衡。

因為必須平衡的零件的形狀、大小、製造特點和使用條件各有不同，而所有這些特點使它們各有特殊情況，需要分別應用一

定的技术方法；所以，显然，平衡过程是机器的制造工艺和使用技术中重要的一步。

苏联科学家和革新者的工作，对平衡的理论和实用有巨大的贡献。金属切削理论的奠基人烏薩乔夫（А. Г. Усачев）創造了平衡机（авт. свид. №45425），比他那时代的技术进步了许多。哈尔科夫基洛夫渦輪發电机制造厂（ХТГЗ）的工作人員，集体研究出了动平衡用的輕便平衡机。在苏联，首先应用电子学来确定零件的未平衡質量〔авт. свид. 陀庫恰叶夫（А. Н. Докучаев）№15601，1938年〕。在这基础上，革新者卡尔塔歇夫（Карташев）造出許多簡單的平衡机。

柯列斯尼克（Н. В. Колесник）拟訂的动平衡方法和仪器已广泛应用（авт. свид. №66999，84121，91517）。还应该指出薩莫依洛夫（З. А. Самойлов），希季柯夫（Б. В. Шитиков）和其他許多学者的工作。

虽然在这一領域里有了無可怀疑的成就，但是，远不是在所有的企業中机器零件的平衡技术都达到足够高度的水平。还有不少的企业，把解决零件平衡的問題，不交給技术檢查科的技师和工作人員，而寄托在这些業務的直接执行者身上。常常不合理地应用靜平衡，在某些情况下，不但無益，反而有害。

所以会發生这种現象，首先是因为在机械制造專業的教學体系中很少注意到零件的平衡問題。在許多高等技术学校和中等技术学校中，甚至还没有这一領域的實驗。

应该指出，关于这問題的技术文献，数量也很少。捷里采尔曼（Зельцерман）的著作〔5〕已經陈旧了，而且很少反映現代的技术。基尼尔曼（Динерман）〔4〕只研究渦輪机轉子的平衡問題。薩莫依洛夫〔12〕研究了电站中的轉子和联动机的平衡問題。希季柯夫〔17〕推荐了他所設計的許多平衡机，但是应用范围有限。

讀过了上面所說的这些書，經驗不足的讀者会發現一串似是

而非的矛盾，非常难于了解它們。另一方面，讀过其中任何一本書之后，試圖將其中的建議应用于特定的生产情况，可能会犯錯誤，因为这些作者完全沒有考虑这种生产的特殊情况。

規定公差、决定工作方法和选择机器設備的类型、建立檢查工艺制度——这些全和生产特点、零件的外形和重量、零件旋轉的角速度、剛度、使用条件等等有关。虽然这些条件極端繁复，但并不是不能建立一种指示，来帮助讀者解决有关机器零件平衡的問題。本書是建立这种指示的初步嘗試。

在写这本書时，著者主要利用列宁格勒工業中的經驗和書末列举的参考文献。本書的对象是工業中的生产人員和技术人員。同时，高等技术学校和中等技术学校的学生和教員，也可以利用本書的实际材料。

著者在 Машгиз 列宁格勒分社悬請 讀者賜予指教，將怀着謝意接受所有的意見和願望，并將在今后考虑它們。

著 者

目 次

序言	4
第一章 基本概念	7
1 轉動零件(7)——2 離心力(8)——3 平面零件的平衡(10)——	
4 轉動物體上離心力的平衡(15)	
第二章 靜平衡	18
5 靜平衡的精密度(18)——6 平行台(20)——7 滾柱平衡機(25)	
——8 圓盤平衡機(30)——9 平衡天平(32)——10 在滾珠軸承上平	
衡零件(36)——11 許用不平衡度(39)——12 靜平衡的應用範圍	
(44)——13 不平衡質量的校正(46)——14 靜平衡工藝學(50)——	
15 檢查(61)	
第三章 動平衡	64
16 振動理論的基本知識(64)——17 動平衡用的簡單設備(72)——	
18 平衡的基本方法(79)——19 擺式平衡機(84)——20 框架式平衡	
機(98)——21 其他幾種平衡機和平衡方法(109)——22 電子學的應	
用(122)——23 許用不平衡度(129)——24 設備的選擇(132)——25 動	
平衡工藝學(134)——26 檢查(139)	
第四章 撓性物體的平衡	144
27 離心力引起的變形(144)——28 基本理論(148)——29 彈性體的自	
由振動頻率(153)——30 撓性體的平衡經驗(158)	
第五章 機器中零件的平衡	166
31 振動的傳播和複合(166)——32 機器振動的許用值(172)——33 測	
振儀器(175)——34 三次試驗法(181)——35 專門儀器(185)——	
36 一次試驗法(193)——37 平面零件的平衡(195)——38 機組的平	
衡(201)——39 活塞式發動機的平衡方法(210)	
參考文獻	214

动平衡与静平衡

柯列斯尼克著

于尔申译

出版者的話

本書敘述了迴轉物体平衡理論的基本概念，研究靜平衡和動平衡方面所用的機器、裝置及儀器等之構造。

可供機器製造工業部門中的工程技術人員參考。

本書經交通大學朱城教授校過，其中有關電子學部分并經徐俊榮先生校過。

苏联 Н. В. Колесник 著 ‘Статическая и динамическая
балансировка’ (Машгиз 1954 年第一版)

*

*

*

NO. 1841

1958 年 10 月第一版 1958 年 10 月第一版第一次印刷

850 × 1168 ¹/₃₂ 字數 171 千字 印張 6 ¹¹/₁₆ 0,001—2,600 冊

機械工業出版社(北京東交民巷 27 號)出版

機械工業出版社印刷廠印刷 新華書店發行

北京市書刊出版業營業許可証出字第 008 號 定價(10) 1.30 元

目 次

序言	4
第一章 基本概念	7
1 轉動零件(7)——2 離心力(8)——3 平面零件的平衡(10)——	
4 轉動物體上離心力的平衡(15)	
第二章 靜平衡	18
5 靜平衡的精密度(18)——6 平行台(20)——7 滾柱平衡機(25)	
——8 圓盤平衡機(30)——9 平衡天平(32)——10 在滾珠軸承上平	
衡零件(36)——11 許用不平衡度(39)——12 靜平衡的應用範圍	
(44)——13 不平衡質量的校正(46)——14 靜平衡工藝學(50)——	
15 檢查(61)	
第三章 動平衡	64
16 振動理論的基本知識(64)——17 動平衡用的簡單設備(72)——	
18 平衡的基本方法(79)——19 擺式平衡機(84)——20 框架式平衡	
機(98)——21 其他幾種平衡機和平衡方法(109)——22 電子學的應	
用(122)——23 許用不平衡度(129)——24 設備的選擇(132)——25 動	
平衡工藝學(134)——26 檢查(139)	
第四章 撓性物體的平衡	144
27 離心力引起的變形(144)——28 基本理論(148)——29 彈性體的自	
由振動頻率(153)——30 撓性體的平衡經驗(158)	
第五章 機器中零件的平衡	166
31 振動的傳播和複合(166)——32 機器振動的許用值(172)——33 測	
振儀器(175)——34 三次試驗法(181)——35 專門儀器(185)——	
36 一次試驗法(193)——37 平面零件的平衡(195)——38 機組的平	
衡(201)——39 活塞式發動機的平衡方法(210)	
參考文獻	214

序 言

在現代機器特有的高工作速度下，轉動零件的平衡問題非常重要。

如果零件對它原來的轉動軸綫平衡好了，在轉動時所產生的離心力就互相平衡，零件材料只產生內應力，外面看不出來。具有這種零件的機器，工作很安靜；在其他條件相同時，效率比較高，比較經濟。

在高速轉動時，即使未平衡的質量不大，也可能產生非常巨大的不平衡離心力而使軸承受動力載荷，這種載荷照例是有害的；這樣就降低了機器的效率，同時使機器要經常修理和過早損壞。

同時，不平衡離心力是機器振動的主要原因之一。而機器的振動是一種非常有害的現象。

振動降低生產率，對工作人員的健康情況也有害處，時常引起職業病；振動使精密機件生產出廢品，並降低產品質量；振動常常使機器損壞，使油管裂開，使自動調節器失效，因而使機器發生事故，引起嚴重的後果和巨大的物質損失。

我國（蘇聯）宏偉的建設事業，要求大量應用各種新型機器。這些機器工作起來必須經濟而可靠。由於轉變能量的機器的主要部分大多是旋轉零件；所以，非常明顯，機器零件的平衡問題在經濟上非常重要。

不僅在製造新機器時需要平衡零件。由於許多原因，在運用期間，零件極易變得不平衡；因而，在運用機器的地方——例如車站、車間、磨粉廠、輪船等等地方——也需要平衡。

因為必須平衡的零件的形狀、大小、製造特點和使用條件各有不同，而所有這些特點使它們各有特殊情況，需要分別應用一

定的技术方法；所以，显然，平衡过程是机器的制造工艺和使用技术中重要的一步。

苏联科学家和革新者的工作，对平衡的理论和实用有巨大的贡献。金属切削理论的奠基人烏薩乔夫（А. Г. Усачев）創造了平衡机（авт. свид. №45425），比他那时代的技术进步了许多。哈尔科夫基洛夫渦輪發电机制造厂（ХТГЗ）的工作人員，集体研究出了动平衡用的輕便平衡机。在苏联，首先应用电子学来确定零件的未平衡質量〔авт. свид. 陀庫恰叶夫（А. Н. Докучаев）№15601，1938年〕。在这基础上，革新者卡尔塔歇夫（Карташев）造出許多簡單的平衡机。

柯列斯尼克（Н. В. Колесник）拟訂的动平衡方法和仪器已广泛应用（авт. свид. №66999，84121，91517）。还应该指出薩莫依洛夫（З. А. Самойлов），希季柯夫（Б. В. Шитиков）和其他許多学者的工作。

虽然在这一領域里有了無可怀疑的成就，但是，远不是在所有的企業中机器零件的平衡技术都达到足够高度的水平。还有不少的企业，把解决零件平衡的問題，不交給技术檢查科的技师和工作人員，而寄托在这些業務的直接执行者身上。常常不合理地应用靜平衡，在某些情况下，不但無益，反而有害。

所以会發生这种現象，首先是因为在机械制造專業的教學体系中很少注意到零件的平衡問題。在許多高等技术学校和中等技术学校中，甚至还没有这一領域的實驗。

应该指出，关于这問題的技术文献，数量也很少。捷里采尔曼（Зельцерман）的著作〔5〕已經陈旧了，而且很少反映現代的技术。基尼尔曼（Динерман）〔4〕只研究渦輪机轉子的平衡問題。薩莫依洛夫〔12〕研究了电站中的轉子和联动机的平衡問題。希季柯夫〔17〕推荐了他所設計的許多平衡机，但是应用范围有限。

讀过了上面所說的这些書，經驗不足的讀者会發現一串似是

而非的矛盾，非常难于了解它們。另一方面，讀过其中任何一本書之后，試圖將其中的建議应用于特定的生产情况，可能会犯錯誤，因为这些作者完全沒有考虑这种生产的特殊情况。

規定公差、决定工作方法和選擇机器設備的类型、建立檢查工艺制度——这些全和生产特点、零件的外形和重量、零件旋轉的角速度、剛度、使用条件等等有关。虽然这些条件極端繁复，但并不是不能建立一种指示，来帮助讀者解决有关机器零件平衡的問題。本書是建立这种指示的初步嘗試。

在写这本書时，著者主要利用列宁格勒工業中的經驗和書末列举的参考文献。本書的对象是工業中的生产人員和技术人員。同时，高等技术学校和中等技术学校的学生和教員，也可以利用本書的实际材料。

著者在 Машгиз 列宁格勒分社悬請 讀者賜予指教，將怀着謝意接受所有的意見和願望，并將在今后考虑它們。

著 者

第一章 基本概念

1 轉動零件

屬於轉動零件範圍的，有好一大批零件，例如：轉軸，帶輪，齒輪，機床主軸，飛輪，飛機和輪船的螺旋槳等等。轉動零件通常叫做轉子。轉子是渦輪機、發電機、電動機、渦輪壓縮機、通風機、渦輪泵、離心機、分離機和其他許多機器的主要零件；轉子質量的平衡與否，對機器的工作品質影響很大。

轉動零件的角速度，是它工作中的特征之一。

試看零件上一点——例如離轉動軸綫 O 的距離是 r 的一点 M （圖1）——的運動。沿圓周等速運動的点 M ，過了一些時候跑到位置 M_1 。轉動零件的平均角速度的定義是，這零件在單位時間內的角度位移。物体的轉角用度、弧度或圓周的幾分之幾來計量。時間用分或秒來計量。在實用上，計量零件的角速度，以零件的一整轉作為角度的單位，以分作為時間的單位。因而，在這情況下，零件在等速轉動時的角度，由這零件每分鐘的轉數 n 來決定。在理論力學中，用弧度作為角度的計量單位、用秒作為時間的單位較為方便。因此，在這里，零件的角速度 ω 由這零件在一秒鐘內轉過的弧度數來決定。

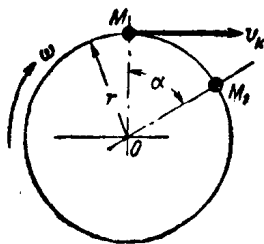


圖 1

要記得，弧度是弧長等於一個半徑的、圓周的中心角。

圓周的長度 $l = 2\pi r$,

式中 $\pi = 3.14$ ——圓周的長度和直徑的比，

r ——圓周的半徑。

這就是說，圓周包含 2π 或 6.28 弧度。

如果知道了零件每分的轉數，則確定它的角速度並不困難：

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{3.14n}{30} \text{。} \quad (1)$$

將 π 的數值圓整為三，則在實用的近似計算中，可以用關係式

$$\omega \approx \frac{n}{10} \text{。}$$

當零件繞軸綫 O 等速轉動時（圖 1），點 M 的速度 v_k 方向沿着切綫，數值不變，這速度由下式確定：

$$v_k = \frac{s}{t} \text{公尺/秒，}$$

式中 s ——經過的路程（公尺），

t ——經過這路程所需的時間（秒）；

或由下式確定：
$$v_k = \frac{2\pi r n}{60} = \omega r \text{公尺/秒，}$$

式中 r ——從點 M 到零件的轉動軸綫 O 的距離。

2 離心力

大家都知道，當零件繞靜止軸綫等速轉動時，這零件的各點只有由公式

$$a_0 = r \omega^2 \text{ (公尺/秒}^2\text{)}$$

確定向心加速度。

這零件上某一點 M 的質量的慣性力（圖 2），由這加速度決定，叫做離心力，由下式計算：

$$C = m r \omega^2 \text{ 公斤，} \quad (2)$$

式中 $m = \frac{G}{g}$ ——這點的質量，用它的重量 G 和重力加速度 g 表示。知道了零件每分鐘的轉數，可由下式直接求出力 C ：

$$C = \frac{G}{g} r \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2 \text{ 公斤。} \quad (3)$$

點 M 的離心力的方向，由這點的徑矢下確定。

例如，設 $r = 0.3$ 公尺， $n = 600$ 轉/分，要求由重量 $G = 0.2$ 公斤的質量產生的離心力。將給出的值代入公式 (3)，得到：

$$C = \frac{0.2}{9.81} \left(\frac{3.14 \times 600}{30} \right)^2 \times 0.3 = 24 \text{ 公斤。}$$

只要大致計算离心力的数值时，可以用較為簡單的公式：

$$C = 11GN^2r, \quad (4)$$

式中 $N = \frac{n}{100}$ —— 零件每分鐘的百轉數。这时，根据給出的值，得到：

$$C = 11 \times 0.2 \times 6^2 \times 0.3 = 23.8 \text{ 公斤。}$$

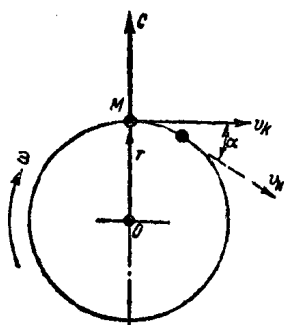


圖 2

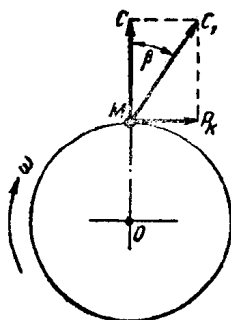


圖 3

如果是变速轉动（加速或减速），質点 M 就不仅受沿半徑方向的离心力 C （圖 3），还要受沿切綫方向的慣性力 P_k ，这力由这質点的轉动加速度决定。这两力的几何和，便是合力 C_1 ，方向和半徑成某一角度 β 。

如果零件的角加速度方向和角速度相同，那末力 C_1 的矢量偏到和轉动方向相反的一側。反之，如果角加速度方向和角速度相反——这时，零件减速轉动——那末力 C_1 的矢量偏到轉动的方向。

在現代机器零件实有的轉速下，即使很小的質量，也可以引起非常大的离心力。現在用圖 4 表明配置在半徑 0.5 公尺处、重 100 克的質量在轉动时产生的离心力和轉速的关系。由圖可以看出，轉速等于 4000 轉/分时，这質量产生的离心力近乎 1 吨；轉速等于 10000 轉/分时，离心力超过 5 吨。根据这些事实，可以想象

得到，在現代高轉速的情況下，機器零件將承受多大的應力。

3 平面零件的平衡

圖 5 a 是支在軸承上轉動的、已平衡的均質盤狀零件。設零件的平面垂直於它

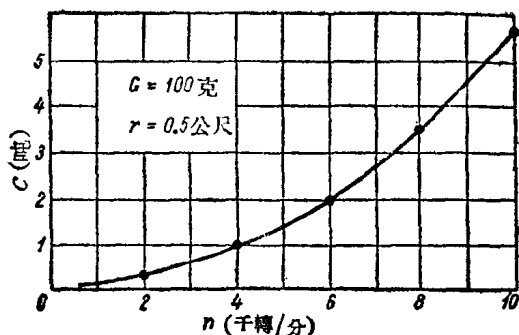


圖 4

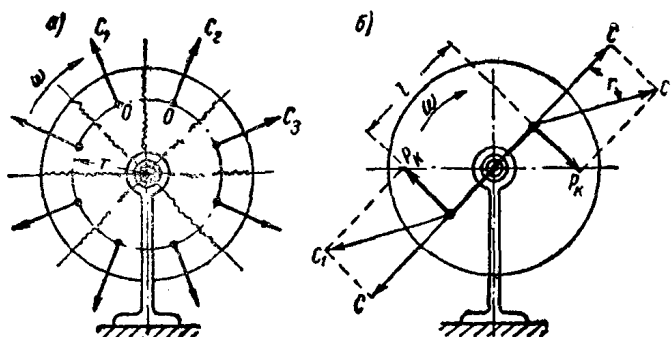


圖 5

的轉動軸綫。將零件的平面分成雙數的相等扇形。零件轉動時，每一扇形的質量將產生離心力 $C_1, C_2, C_3, \dots$ 。這些力的數值都相等，方向則每一對都彼此相反。結果它們形成一個平衡系統。這種力系不會在軸承上造成動壓力，僅僅引起零件材料中的內應力。當零件加速或減速時，出現了附加的慣性力 $P_{K1}, P_{K2}, P_{K3}, \dots$ 。這一力系在盤的平面內形成力偶，也不會在零件的軸承上引起動壓力（圖 5 b）。

因此，求這種轉動零件的質量的離心力的平衡條件時，可把零件的角速度當作常量。

圖 6 a 是一個除個別部分 G_1, G_2, G_3 外質量已平衡好的零件。這些部分的未平衡質量，在轉動時造成不平衡離心力 C_1, C_2 和 C_3 。

由圖可以看出，由力 $\vec{C}_1$ 和 $\vec{C}_2$ 的几何和得出力 $\vec{C}$ ，这力再和力 $\vec{C}_3$ 相加，得出所有三个不平衡力的合力 $\vec{C}_0$ 。这样，平面零件的不平衡离心力，不論有几个，总可以連續相加成一个和这些离心力等量的合力 $\vec{C}_0$ 。这力將在軸承上造成有害的附加压力，并引起机器的振动。显然，数值和方向都与 $\vec{C}_0$ 相同的离心力，也可以由和部分 G_1 、 G_2 、 G_3 的質量等量的簡化質量 m_H 来产生。因此，这种零件的动平衡条件，可以用安置平衡質量 m_Y 的方法来保証；这質量放在和簡化未平衡質量 m_H 正相反的一側，質量 m_Y 这样計算：这質量造成的平衡离心力等于合力 C_0 ，即：

$$m_H \omega^2 r = m_Y \omega^2 R。$$

化簡后，得到： $m_H r = m_Y R。$

用 G_H 和 G_Y 来表示質量 m_H 和 m_Y 的重力（圖 6 6），就可以写成：

$$G_H r = G_Y R。 \quad (5)$$

由此可見，未平衡質量和平衡質量的重力对零件轉动軸綫的力矩，数值相等而符号相反。这样，零件的平衡問題，化为确定平衡載重 G_Y 的位置和数值的問題。

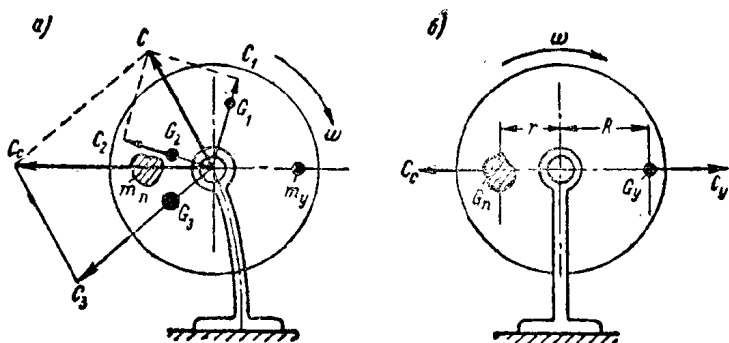


圖 6

如果未平衡零件放在水平導軌上，那末，在圖 7 a 的位置上，未平衡質量的重力 G_H 就产生使零件沿導軌滾动的轉矩 $M_H = G_H r$ 。这轉矩的数值，和零件的位置〔或者也就是未平衡質量的位置〕（圖