

国内机械式风洞天平手册



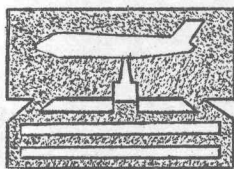
贈閱
請交換



V211.74-62

1002-4

国内机械式风洞天平手册



30895283

《国内机械式风洞天平手册》编写组

一九八〇年一月

前 言

我国机械式风洞天平的研制和使用已有二十多年的历史。二十多年来，国内机械风洞天平从无到有、从小到大、从低级到高级，在吸取国外先进经验的基础上，走出了我国自行设计、研制和发展的道路。目前，在用天平近20台。广大机械天平和风洞试验技术人员在从事天平的设计、安装、调查、校正和使用等方面积累了丰富的经验。由于机械天平具有精度较高、测力载荷域广、性能稳定、对工作环境条件要求低等优点，所以目前这类天平依然是我国低速风洞测力的主要仪器设备，并且正在向数据采集和控制自动化方向发展。

1977年7月，“7210”办公室在哈尔滨召开了第一次全国风洞天平技术交流会，会议交流了有关机械式风洞天平的研制和使用经验，并决定编写《国内机械式风洞天平手册》。

编写这本《手册》的目的在于较全面地总结国内机械天平设计、安装、调查、校正和使用等方面的经验。对于已经和正在从事这方面工作的工程技术人员，《手册》是一本工具书；对于准备和刚刚从事这方面工作的工程技术人员，《手册》则是一本有益的参考书。

本手册由“7210”办公室组织有关单位集体编写而成。参加编写的人员有：仇畔祥、李凤蔚、孙庆和、孙广义、章子林、姚惠中、李栋、孙立友、秦燕华、叶明磊、田秀荣等同志，范浩川同志担任总编工作。

在该手册编写过程中，得到了三机部六二七所、二十九基地一所、六所，西北工业大学，北京大学，南京航空学院，七机部701所等单位及有关同志的大力支持，仅此致谢。

由于我们水平有限，加之时间仓促，《手册》难免出现某些缺点和错误，敬请读者指正。

《国内机械式风洞天平手册》编写组

一九八〇年元月

目 录

- 第一章 基本概念 (1)
 - § 1—1 机械式风洞天平 (1)
 - § 1—2 机械式风洞天平的分类 (1)
 - § 1—3 天平轴系 (2)
 - § 1—4 天平量程 (3)
 - § 1—5 感量、灵敏度和静稳定度 (3)
 - § 1—6 精密度和准确度 (4)
 - § 1—7 动稳定性 (4)
 - § 1—8 频率特性 (4)
 - § 1—9 阻尼特性 (5)
 - § 1—10 动态响应时间 (5)
 - § 1—11 动态特性 (5)
- 第二章 设计原理 (6)
 - § 2—1 静平衡状态下的设计原理 (6)
 - (一) 刚体与弹性体, 内力与外力 (6)
 - (二) 在空间任意力系作用下, 刚体的平衡
——静力学平衡方程式 (6)
 - (三) 零位测力与变位测力 (7)
 - (四) 自由度 (8)
 - (五) 虚位移原理 (9)
 - (六) 各分力系统力的独立传递与干扰的消除 (9)
 - § 2—2 天平的运动方程式 (12)
 - (一) 台式天平力矩台的运动学 (12)
 - (二) 塔式天平的运动学 (12)
 - (三) 塔的运动方程式 (13)
 - (四) 台式天平力矩台的运动方程式 (14)
 - (五) 天平相当系统的运动方程 (15)
 - § 2—3 天平的动态特性 (17)
- 第三章 总体设计 (22)
 - § 3—1 设计技术要求 (22)

§ 3-2	设计程序	(24)
§ 3-3	设计载荷的选择	(25)
第四章	受力分析	(27)
§ 4-1	塔式天平	(27)
(一)	X 传力系统	(27)
(二)	Z 传力系统	(27)
(三)	Y 传力系统	(28)
(四)	M _Z 传力系统	(29)
(五)	M _X 传力系统	(30)
(六)	M _Y 传力系统	(30)
§ 4-2	单台式天平	(32)
(一)	X, M _Y 传力系统	(32)
(二)	Y, Z, M _X 传力系统	(33)
(三)	M _Z 传力系统	(33)
§ 4-3	双台式天平	(34)
第五章	设计计称	(36)
§ 5-1	独立性支承的计称	(36)
(一)	X 形独立性支承	(36)
(二)	十字形独立性支承	(37)
(三)	独立性支承计称的曲线结果	(38)
(四)	力台平移吊线	(42)
(五)	力矩台斜吊线	(42)
(六)	独立性支承的强度计称	(42)
§ 5-2	系统的稳定度	(43)
§ 5-3	刚度、强度计称	(44)
(一)	前支杆	(44)
(二)	尾支杆	(45)
(三)	α 机构尾连杆	(45)
(四)	斜吊线, 平移吊线	(46)
(五)	拉杆、杠杆	(47)
(六)	升力大摇臂	(47)
(七)	力矩台、力平台、架车	(49)
(八)	千斤顶	(49)
(九)	蜗拴	(50)

§ 5-4	其它计称	(51)
第六章	结构设计	(52)
§ 6-1	模型支杆	(52)
	(一) 用途	(52)
	(二) 分类	(52)
	(三) 支撑形式	(52)
	(四) 断面形状的选择	(53)
	(五) 间距调节	(53)
§ 6-2	角度机构	(54)
	(一) 分类	(54)
	(二) 角度变化范围	(54)
	(三) 角度变化方式	(54)
	(四) 角度分度精度	(54)
	(五) 角度变化速率	(54)
	(六) 结构型式	(55)
	(1) α 角度机构	(55)
	(2) β 角度机构结构	(56)
§ 6-3	力的传递系统	(56)
	(一) 平移机构	(56)
	(1) 平行四边形平移机构	(56)
	(2) 柴贝谢夫(Чебышев)机构	(57)
	(二) 塔式机构	(57)
	(三) 传力机构	(57)
	(1) 摇臂(杠杆)	(57)
	(2) 拉杆	(58)
	(3) 调节接头	(58)
	(4) 弹性支承	(58)
§ 6-4	天平元件	(60)
	(一) 游码式	(60)
	(二) 电磁式	(61)
	(三) 电码盘式	(62)
	(四) 应变式	(62)
	(1) 环形	(63)
	(2) 框形	(64)

	(3) 片形	(66)
第七章	天平校正设备	(67)
§ 7-1	校正设备的性能要求	(67)
	(一) 承载能力	(67)
	(二) 精密度与准确度	(67)
	(三) 灵敏度	(67)
	(四) 自动化程度	(67)
§ 7-2	校正设备的组成	(67)
	(一) 中心加载架	(68)
	(二) 力源	(68)
	(三) 传力件	(68)
	(四) 位移装置	(72)
	(五) 控制系统	(73)
	(六) 基座	(73)
§ 7-3	校正设备的干扰	(73)
	(一) 砝码误差的影响	(73)
	(二) 中心加载架加工误差和刚性不足的影响	(74)
	(1) 力矩接头误差	(74)
	(2) 力接头误差	(75)
	(3) 中心加载架重心移动的影响	(79)
	(4) 中心加载架刚性不足的影响	(80)
	(三) 加载滑轮和弹性支承摇臂的影响	(81)
	(1) 加载滑轮	(81)
	(2) 弹性支承摇臂	(83)
	(四) 连索的影响	(83)
	(1) 连索安装误差	(83)
	(2) 连索垂荡, 予紧力影响	(84)
	(3) 连索弛起值的影响	(85)
	(五) 校正台刚度不足的影响	(86)
	(1) 浮沉影响	(86)
	(2) 水平位移影响	(86)
	(3) 校正台偏斜的影响	(86)
	(六) 接头间隙和孔销间隙的影响	(87)
	(1) 沿 X 向偏移 δ_x 的影响	(87)

	(2) 沿 z 向偏移 δ_z 的影响	(87)
	(3) 沿 y 向偏移 δ_y 的影响	(88)
	(4) 绕 Oy 轴旋转 $\delta\phi_1$ 的影响	(88)
	(5) 绕 Oz 轴旋转 $\delta\phi_2$ 的影响	(88)
	(6) 绕 Ox 轴旋转 $\delta\phi_3$ 的影响	(88)
	(七) 天平刚度不足的影响	(88)
§ 7-4	校正设备各部件的设计要求	(91)
	(一) 许用误差分配	(91)
	(二) 砝码	(92)
	(三) 中心加载架	(92)
	(四) 加载滑轮	(93)
	(五) 连索	(94)
	(六) 校正台	(94)
	(七) 间隙	(95)
第八章	天平干扰分析	(96)
§ 8-1	塔式天平的干扰分析	(96)
	(一) 单分号干扰	(96)
	(1) 力对力矩的干扰	(96)
	(2) 力矩对力矩的干扰	(103)
	(3) 力矩对力的干扰	(105)
	(4) 力对力的干扰	(107)
	(二) 塔式六分号天平复合干扰	(110)
	(1) 支杆在 X 方向的变形 ΔX 引起的复合干扰	(110)
	(2) 支杆在 z 方向的变形 Δz 引起的复合干扰	(111)
	(3) 支杆在 y 方向的变形 Δy 和力矩台移动 $\Delta y'$ 引起的复合干扰	(111)
	(4) 力矩台扭转 δ 角引起的复合干扰	(111)
	(5) 力矩台在 z 方向移动 $\Delta z'$ 引起的复合干扰	(112)
	(6) 力矩台在 X 方向移动 $\Delta X'$ 引起的复合干扰	(113)
§ 8-2	台式天平的干扰分析	(114)
	(一) 双台式天平的干扰	(114)
	(1) 阻力引起的干扰	(115)

	(2) 侧力引起的干扰	(117)
	(3) 升力引起的干扰	(117)
	(4) 俯仰力矩引起的干扰	(118)
	(5) 滚转力矩引起的干扰	(118)
	(6) 偏航力矩引起的干扰	(118)
	(二) 单台(联动)台式天平的干扰	(121)
	(1) 升力引起的干扰力矩	(121)
	(2) 滚转力矩引起的对偏航力矩的干扰	(122)
	(3) 俯仰力矩引起的干扰力矩	(122)
	(4) 阻力引起的对力矩的干扰	(122)
	(5) 侧力引起的对力矩的干扰	(123)
	(6) 偏航力矩引起的对滚转力矩的干扰	(124)
第九章	天平的调查和校正	(127)
§ 9-1	调查、校正的目的和程序	(127)
	(一) 调查和校正的目的	(127)
	(1) 天平调查目的	(127)
	(2) 天平校正目的	(127)
	(二) 调查和校正程序	(128)
	(1) 调查程序	(128)
	(2) 校正程序	(128)
§ 9-2	调查、校正的主要设备和仪器	(129)
	(一) 校正架	(129)
	(二) 通用工具	(129)
	(三) 校正设备的安装	(129)
§ 9-3	天平的调查	(129)
	(一) 调查内容	(129)
	(二) 调查方法	(129)
	(1) 天平在风洞实验段位置的调查	(129)
	(2) 天平一般技术特性的调查	(130)
	(3) 天平各分另之间干扰的调查	(133)
	(i) 单元调查法	(133)
	(ii) 多元调查法(矩阵法)	(138)
§ 9-4	从天平调查的观点对设计提出的要求	(143)
§ 9-5	天平的静校	(143)

(一) 单元校正	(144)
(1) 单元校正的准备工作	(144)
(2) 加载测定	(144)
(3) 校正系数的计算	(146)
(i) 最小二乘法	(146)
(ii) 联立方程法	(147)
(二) 多元校正	(148)
(1) 加载方案的确定	(148)
(2) 天平系数的计算	(154)
(3) 校正设备的影响	(158)
(4) 多元校正法的优点	(160)
§ 9-6 天平静校结果的处理	(160)
(一) 误差的表示法	(160)
(二) 精密度计算	(161)
(三) 准确度的计算	(163)
(四) 可疑测定值的舍弃	(163)
(五) 天平静校结果的表示	(164)
§ 9-7 天平的动校	(164)
第十章 天平的使用和维护	(168)
§ 10-1 天平的使用	(168)
(一) 使用前的准备工作	(168)
(二) 使用常规	(169)
(三) 使用后的检查	(169)
§ 10-2 天平的维护	(169)
第十一章 主要天平介绍	(171)
§ 11-1 国防科委二十九基地一所FL-12风洞 塔式机械六分号天平	(171)
§ 11-2 三机部六院六二七所FL-8风洞塔式 机械六分号天平	(174)
§ 11-3 七机部701所FD-09风洞塔式机械四 分号天平	(177)
§ 11-4 七机部701所FD-09塔式机械六分号 天平	(180)

§ 11-5	六机部七院702所02风洞塔式机械 六分号天平	(183)
§ 11-6	南航NH-2FD塔式机械六分号天平	(186)
§ 11-7	北航D-4风洞塔式机械六分号天平	(188)
§ 11-8	北大4号风洞联动台式六分号天平	(191)
§ 11-9	西工大2号风洞台式机械六分号天平	(194)
§ 11-10	三机部六院六二七所FL-5风洞台式 机械六分号天平	(198)
§ 11-11	国防科委二十九基地一所FL-11风洞 台式机械六分号天平	(200)
§ 11-12	五机部203所2号风洞台式机械六分 号天平	(202)
§ 11-13	三机部五二〇厂φ2.5米风洞台式机械 三分号天平	(204)
§ 11-14	六机部七院708所φ1.5米风洞台式机 械三分号天平	(206)
附录：国内主要天平性能参数表		(208)
主要参考资料		(210)

第一章 基本概念

§ 1-1. 机械式风洞天平

用于测力作用于模型上的空气动力和力矩的仪口或装置称为空气动力天平。在风洞中使用的空气动力天平称为风洞天平。对于不同的风洞，不同的实验对象，往往采用不同型式的天平。如：机械天平、液压天平和电磁天平等。

风洞天平一般由三部份组成，即力的分解机构、传力系统和测力系统。

对于机械式风洞天平，力的分解机构和传力系统，主要由力矩台、力台、拉杆、杠杆、弹性支承、弹性吊线等组成，并通过它们将作用于模型上的力分解并传至测力系统。天平本身包含支撑模型的支桿和改变模型姿态的 α 、 β 机构。

§ 1-2. 机械式风洞天平的分类

(一) 按测力数目分：

(1) 单分力天平——只能测力一个空气动力分力的天平。如阻力天平等。

(2) 多分力天平——可同时测力两个以上分力的天平。其中以三分力天平和六分力天平常用。

(二) 按结构型式分：

(1) 塔式天平——吊挂分解力矩分力的力矩台的三根或四根斜吊杆的中心线的延长线交于一点（塔尖又称塔心），使力矩台成塔形的机械天平。塔心为力的分解中心。

(2) 台式天平——力矩台和力台都由平行吊杆悬吊起来的机械天平。天平纵轴与各分力系统的第一级拉杆引出线组成的平面的交点为相应的力的分解中心。

(3) 靴式天平——与一般台式天平的主要区别在于将力的分解中心上移至天平坐标原点（模型支点）上。因此靴式天平框架必须横跨试验段，机构庞大，容易引起变形。

(三) 按测力元件型式分：

(1) 称杆元件天平——用电机带动丝杠、游码，靠游码位移提供天平的平衡力。其中按一次仪表不同，又分两种：

(i) 记数元件——测另结果以记数器读故显示，靠人读或机械打印记录。

(ii) 电码盘元件——在丝杠上装码盘机构，测另结果以电信号输出，可实现自动检测。

(2) 电磁元件天平——在机械天平传力系统的末级装电磁力平衡式天平元件。与元件杠杆联动的反馈线圈在永久磁缸的气隙中，受到磁场作用产生电磁力与外载荷平衡。

(3) 机械应变元件天平——在机械天平的传力系统某一级中加装应变元件（如应变环等），将气动力和力矩变成电信号输出。此种天平元件可与称杆元件同时使用。

(四) 按自动化程度分：

(1) 手动天平——观测者要用手去操纵天平并记录读故。

(2) 半自动天平——天平能自动调套平衡并给出读故。但不能自动记录。

(3) 自动天平——天平能自动调节平衡和自动记录。可以联电子计算机对试验结果进行处理。

§ 1-3 天平轴系

机械式天平通常采用洞体坐标轴系或半机体坐标轴系(图1-1)

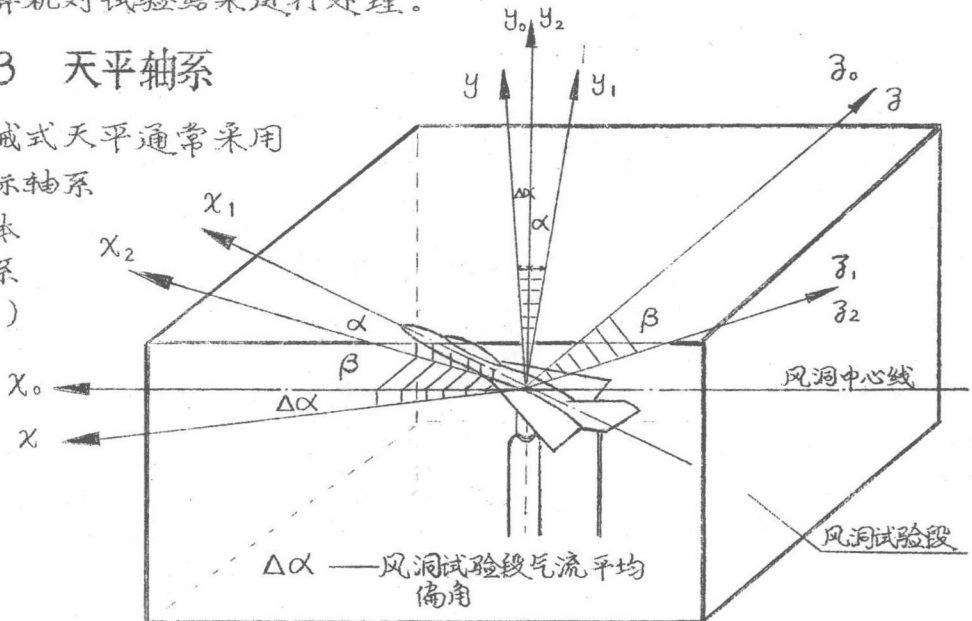


图1-1 天平轴系 (X_0, Y_0, Z_0 ——洞体坐标轴; X, Y, Z ——气流坐标轴; X_2, Y_2, Z_2 ——半机体坐标轴; X_1, Y_1, Z_1 ——机体坐标轴)

(一) 洞体坐标轴系——坐标原点取为天平主支杆的模型连接销孔中心线与风洞试验段纵对称面的交点， Ox_0 轴与试验段轴线重合，指向试验段入口； Oy_0 轴在试验段对称面内，垂直向上为正（倒塔式天平， Oy_0 轴向下为正）； Oz_0 轴垂直于 Ox_0Oy_0 平面，与 Ox_0 、 Oy_0 轴符合右手定则。

洞体坐标系与气流坐标系 $X_1Y_1Z_1$ 不同。气流坐标轴系的 Ox 轴指的来流方向。通常风洞试验段气流方向不与试验段轴线平行，而有平均气流偏角 $\Delta\alpha$ 和 $\Delta\beta$ 。若来流方向无偏角，则气流坐标轴系与洞体坐标轴系重合。

(二) 半机体坐标轴系——坐标原点同上， Ox_2 轴始终在水平面内，与模型轴线在水平面内投影重合，指向模型前方； Oy_2 轴在模型纵对称面内垂直向上； Oz_2 轴与 Ox_2 、 Oy_2 轴符合右手定则。

当迎角 $\alpha = 0$ 时半机体坐标轴与机体坐标轴 $X_1Y_1Z_1$ 重合；当侧滑角 $\beta = 0$ 时，半机体坐标轴与洞体坐标轴系重合。

§ 1-4. 天平量程

天平能测量的最大载荷范围。

设计天平时根据风洞尺寸，最大风速和被测对象的要求估算最大载荷确定的各分量之量程，称为设计量程。

天平经过调试后，考虑到天平实际刚度、强度等因素，为保证天平性能和使用要求而确定的量程称为实际量程（又称使用量程）。使用量程与设计量程一般不同，但往往差别不大。

§ 1-5. 感量、灵敏度和静稳定度

(一) 感量

测量元件刚能观测到反应的最小载荷。

为了便于记录 and 比较，规定测量元件改变半个最小刻划所需的载荷为感量（或称灵敏载荷）。

(二) 灵敏度

在单位外力作用下所产生的称杆的转角或位移或计数口读数的改变量。

(三) 静稳定度

包括任意个拉杆和摇臂等环节的天平系统，其静稳定度为测量元件有单位指示（如称杆有单位转角或单位位移或计数口读数改变

一个字)时所具有的恢复力或力矩的值。

可见,系统的静稳定性和灵敏度互为倒数。

优良的天平系统必须具有较高的灵敏度和足够的静稳定性。

§ 1-6. 精密度和准确度

(一) 精密度

测定值与最可信值(算术平均值)之差相对于最大载荷的百分比。一般用测定值的标准误差表示。

天平的精密度有动态测定的精密度(简称动态精度)和静态测定的精密度(简称静态精度)之分。前者比后者下降三倍左右。

(二) 准确度

测定值与真值之差相对于最大载荷之百分比。

在一组测定中,精密度可能很高,但准确度并不一定很高:可是,准确度高的天平,精密度一定高。

§ 1-7. 动稳定性

若天平某一系统由于外来的不大的扰动,使系统失去平衡状态,扰动消除后,经过足够长的一段时间,系统能恢复到原来的平衡状态,则这个系统是动稳定的,否则是动不稳定的。

研究天平系统的动稳定性就是研究该系统的运动特性,可以用解特征方程的根来判断系统的动稳定性。

天平系统具有足够的静稳定性是保证它具有动稳定性的必要条件。而系统动稳定性的充要条件是系统运动方程式中特征方程的根的全部为负值。

§ 1-8. 频率特性

天平某一系统的频率特性是指当脉动的载荷以正弦输入时,该系统在稳定状态下输出和输入之比。

当模型的外形和状态一定时,一般可以认为风洞的脉动气流作用在模型上以正弦载荷输入给天平系统,在达到稳定状态时,系统有一个正弦输出。当系统的自振频率较小时,其输出量的振幅主要与气流的脉动强度和湍流尺度及系统的阻尼系数和弹簧常数有关。输出量的频率大致和外载荷的频率相同,而与天平系统的固有频率无关。输出和输入的相位不同,有一个滞后。

§ 1-9. 阻尼特性

天平某一系统的阻尼特性是指输出号的振幅随周期的变化关系。我们要求每一个天平系统达到某一个动态平衡状态时，输出号的振幅不能太大，同时要具有滤除高频气流或噪音的特性，而且振幅要迅速衰减，以便于准确确定所处的平衡状态。为此必须有阻尼装置，如油阻尼口，电磁阻尼器等。其阻尼系数大小根据天平和载荷的特性适当的选择。用时间相差一个周期的二个相邻振幅之比的自然对数值估号阻尼的大小。

§ 1-10. 动态响应时间

某系统一个动态平衡状态变到另一个动态平衡状态时，其过渡过程所持续的时间。它取决于天平的固有特性和输入给天平之脉动载荷的性质。

§ 1-11. 动态特性

天平在脉动载荷作用下的输出号随时间的变化。它是天平的动态稳定性，频率特性，阻尼特性，动态响应时间等描写天平动态能指标的综合反映。它既描写了系统由一个平衡状态到另一个平衡状态过渡过程品质的好坏，又描写了过度到新平衡状态后稳定性和可靠性。

第二章 设计原理

§ 2-1. 静平衡状态下的设计原理

(一) 刚体与弹性体、内力与外力。

各点间距离始终保持不变的体系、叫做刚体。也就是说此体系受力后将不发生任何变形，而受力后发生变形的体系就叫做弹性体。在大多数情况下，由于变形微小，天平系统可近似看作刚体。

在刚体内，力的作用点，可以沿力的方向移至另一点，而不改变力的作用。凡是作用相同的一些力叫做等价力。凡是把其它力的作用完全抵消的一些力，叫做平衡力。如果已给力系的等价力是一个力，那么这个力称为已给力系的合力。

内力与外力：质点系内各质点间相互作用的力，称为这质点系的内力，不属于该质点系的物体或质点作用在这质点系上的力，称为这质点系的外力。

(二) 在空间任意力系作用下，刚体的平衡——静力学平衡方程式。

设空间有一物体，受任意力系 $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3, \dots$ (图2-1)作用，现在要求此物体的平衡条件。用一任意位置的直角坐标系来规定物体的位置，并把所有的力向坐标原点简化，此时必须加上一此力偶。

设 $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3, \dots$ 在 $OXYZ$ 坐标系各坐标轴上的投影分别等于 $(X_1, Y_1, Z_1), (X_2, Y_2, Z_2), (X_3, Y_3, Z_3), \dots$ 而作用力点 A_1, A_2, A_3, \dots 的坐标分别等于 $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), (x_3, y_3, z_3), \dots$ ；用 (X, Y, Z) 代表合力 \vec{F} 的投影，用 (M_x, M_y, M_z) 代表合力矩 \vec{M} 的投影，则得：

$$\begin{cases} X = X_1 + X_2 + X_3 + \dots = \sum_n X_n \\ Y = Y_1 + Y_2 + Y_3 + \dots = \sum_n Y_n \\ Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 + \dots = \sum_n Z_n \end{cases} \quad (2-1)$$

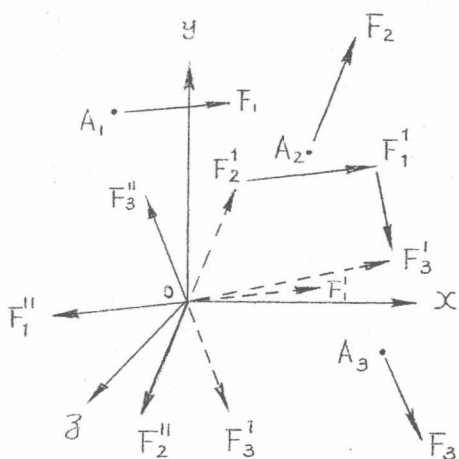


图 2-1