

架空送电线路 现场施工应用手册

新疆送变电工程公司
陈培慈 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

架空送电线路 现场施工应用手册

新疆送变电工程公司

陈培慈 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

为了系统地提高送变电初、中、高级线路员工基本操作技能和工程技术人员的技术水平,在遵照我国现行的国家标准、行业标准及相关规定的基础上编写了本书。

本书共包括十章,主要内容有基本知识及应用、送电线路设计、材料、工地运输、测量、基础、杆塔、架线、过电压、绝缘、接地、施工管理等。

本书最大特点就是实用性强,专门为线路施工一线员工所写。

本书可供线路施工人员、线路设计单位、供电单位相关人员使用,还可供大专院校师生学习参考,同时又可作为技能鉴定辅助教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

架空送电线路现场施工应用手册/陈培慈编著. —北京:
中国电力出版社, 2008

ISBN 978-7-5083-6725-5

I. 架… II. 陈… III. 架空线路: 输电线路-工程施工-
技术手册 IV. TM726.3-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 014722 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 10 月第一版 2008 年 10 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 23.625 印张 622 千字

印数 0001—3000 册 定价 49.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

序

伴随着我国电网建设的发展，送变电公司作为电网建设的重要施工力量，承担了电网建设繁重而艰巨的施工任务。为了系统的提高送变电路工的基本操作技能和工程技术人员的专业水平，1953年毕业于东北大学、在新疆送变电工程公司近50年的成长过程中一直专攻送变电专业，积有50余年送变电设计施工及管理经验的教授级高工陈培慈同志，重视理论联系实际，重视几代送变电人在架空送电线路施工实践中所积累的宝贵经验，从提高施工技能出发，收集了大量的实际施工事例，把自己几十年在线路施工一线所积累的经验、体会、成果汇总起来，加以科学的总结和提炼，编纂成了系统性的作业指导书与培训教材《送电线路实践手册》。其所具有的科学性、实用性和可操作性，对今后架空送电线路建设施工以及维护检修具有十分重要的指导意义。

送电线路施工特点和难点是点多、线长、面广，施工条件复杂，既要求线路工人有较好的个人素质，又要求线路施工队伍有较全面的群体素质。在线路施工、检修作业中，不正确的操作方法、不严密的施工技术措施和组织措施都是酿成事故的隐患，如何确保施工安全、优质、高效，一直是各级领导和职工关注的热点。加强对线路施工、检修人员的技术培训，让他们切实掌握线路施工技术已是当务之急；继续深化改革、更新观念，进而加强施工组织管理和技术管理，加强文明施工，提高工程质量，控制工程造价，努力实现送电线路基建移交生产达标，已成为送电线路建设的最终目标。科学技术突飞猛进，面对今后电力建设中出现的新问题，期待后来人对手册充实发展提高，使之日臻完善。

目前，电网建设的规模与速度势不可当，推动了经济建设的快速发展，从高压、超高压到特高压，电压等级在不断提高，对专业技术的要求越来越高，对专业人员快速掌握实用专业技术的需求也越来越高，迫切需要一种理论与实践紧密联系的教科书。本书倾作者毕生精力而成，正是体现了快速掌握送电线

路施工专业的实用性，加强理论与实践的紧密结合，对从事送电线路的施工人员而言，是一本很好的培训教材；对工程技术人员和施工管理人员而言，是一本很好的参考书和工具书。原《送电线路实践手册》分上下两册，自2005年内部两次印刷发行以来，为解决现场施工技术问题提供了好的经验和方法，以“靶的准，拿来就用”受到新疆区内外同行的重视与好评，又被新疆职业技能鉴定站选为线路质量资质认证的辅助教材；目前，在电力建设快速发展时期，本书得到中国电力出版社的重视，认为公开发行将更加有助于提高施工现场技术人员的操作水平，特重新核订和编排而成一册，取名为《架空送电线路现场施工应用手册》。

本书曾先后聘请韩崇、陈西康、赵尔安、龚循礼四位资深专家进行审阅。内部出版时我任新疆送变电工程公司总经理，在即将公开发行之际，对现任新疆送变电工程公司总经理王修江同志的大力支持及以上四位专家的认真审核表示衷心感谢，同时对陈培慈老先生为送变电事业孜孜以求、诲人不倦的精神表示敬佩，对本书的出版表示热烈祝贺。

西北电网乌鲁木齐建设公司经理

范学明

2008年9月

前言

为实现全面建成小康社会的奋斗目标，十七大要求人均国内生产总值到2020年比2000年翻两番。这就必然要求能源有相应的保障和相应的发展速度。我国是能源消费大国，然而，2/3的能源资源主要分布在西部，而2/3的能源需求主要分布在东部，为此需要通过特高压电网西电东送，来实现我国的能源资源优化配置和保证我国的能源安全。

胡锦涛总书记指出：解决好农业、农村、农民问题，事关全面建设小康社会大局，必须始终作为全党工作的重中之重。安全、可靠、充足、经济的电力供应是新农村建设的重要基础和保障。电力为农村发家致富带来了光明和希望，电力改善了农民的生活质量，电力加快了农村社会进步，是幸福之源，必须建设坚强的农村电网。为了促进国民经济又好又快的发展，为了改善民生。通过电网供电实现了电网的市场功能；电力工业与各行各业、千家万户息息相关须臾不可离开。人们体会到电力既能降低劳动强度又能提高劳动生产率。电力是清洁方便易于转换的能源。电是现代社会文明的体现，是生活质量高低的标志。电网大面积停电是现代社会的灾难。2008年年初的一场特大冰冻灾害造成我国南方各省大量送电线路和变电所严重损坏；铁路通信金融和人民生活受到重大影响；引起党中央和国务院高度重视，温总理强调抗灾救灾工作以电网恢复重建为重点。社会各方和各级政府都期盼着加快建设以特高压电网为骨干网架、各级电网协调发展的坚强国家电网。在相当长的时期内电网建设必然会大规模、大发展、大提速。

教育是民族振兴的基石，实施科教兴国、人材强国战略是全局性的问题。提高员工综合素质是提高企业核心竞争力的主要手段。建立学习型企业，实施全员教育培训是各企业当务之急，本书宗旨在于大家共同提高技术素质，提高和钻研架空送电线路专业技术知识，为祖国现代化建设尽一份力。她面向电网员工，面向地方电网，面向农村电网；由于是亲身经历的实践经验总结，易懂

易操作，也可作为外专业人员的入门书。

本书在编写过程中得到了新疆送变电工程公司原总经理范学明和现任总经理王修江的大力支持和资助。书稿又特请资深、造诣深的专家韩崇、陈西庚、赵尔安和龚循礼审稿。还得到兄弟单位竭诚支持，特致谢意。

本书为新疆送变电工程公司成立 50 周年献礼！

由于本人能力和眼界有限，书中谬误与差错难免，真诚希望各界朋友和广大读者批评指正。

陈培慈

2008 年 8 月

目 录

序

前言

第一章 基础知识 1

第一节 物理学基础	1
第二节 电工学	14
第三节 计量	26

第二章 送电线路设计 32

第一节 供电线路设计	32
第二节 杆塔设计	39
第三节 对电信线路的影响	58
第四节 定位	66
第五节 防雷与绝缘配合	81
第六节 接地设计	92
第七节 线路与变电的配合	96

第三章 材料 97

第一节 线材	97
第二节 绝缘子	105
第三节 钢材	111
第四节 金具与标准件	123
第五节 钢筋混凝土电杆	126
第六节 混凝土预制件	133

第四章 工地运输 136

第一节 平均运输距离	136
第二节 提货要点	137
第三节 装卸与堆放	138
第四节 物质密度	142
第五节 摩擦系数	144
第六节 线路施工常用绳扣	144

第七节 运量计算.....	147
---------------	-----

第五章 测量	149
---------------	------------

第一节 基本知识.....	149
第二节 通用测量.....	151
第三节 分坑测量.....	158
第四节 常用各项测量.....	167
第五节 测量常用计算器操作.....	172
第六节 时针方位表述法.....	175

第六章 基础	176
---------------	------------

第一节 土方工程.....	176
第二节 土壤浸蚀性与基础防腐.....	180
第三节 铁塔基础浇筑用材料.....	181
第四节 混凝土的拌和与浇筑.....	188
第五节 铁塔基础冬期浇筑.....	192
第六节 施工用地锚.....	195
第七节 质量检查.....	197

第七章 杆塔	200
---------------	------------

第一节 钢筋混凝土杆.....	200
第二节 铁塔.....	212
第三节 起重.....	223
第四节 农电线路立杆.....	231
第五节 拉线.....	233

第八章 架线	238
---------------	------------

第一节 架线设计与计算.....	238
第二节 防振.....	248
第三节 导地线的压接与补修.....	255
第四节 跨越架与放线.....	266
第五节 架线工艺.....	273
第六节 张力架线.....	286

第九章 过电压、绝缘、接地	305
----------------------	------------

第一节 过电压.....	305
第二节 绝缘.....	306
第三节 接地施工作业与接地电阻测量.....	307

第一节 安全.....	315
第二节 质量管理.....	321
第三节 经济核算.....	329
第四节 其他技术管理.....	340
附录 A DL/T 5033 输电线路对通信线路危险和干扰影响防护 设计规程允许值 (摘录)	350
附录 B 线路用数学及其应用	351
后记.....	364
参考文献.....	366

第一章 基础知识

第一节 物理学基础

一、常用物理公式

(一) 速度

$$v = \frac{\text{位移 } S}{\text{时间 } t}$$

(二) 匀变速运动

末速 v_t = 初速 v_0 + 随时间而增加的速度 at

$$S = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$$

$$a = \frac{v_t - v_0}{t}$$

$$v_t^2 = v_0^2 + 2aS$$

以上式中 S ——加速运动的位移；

a ——加速度；

t ——运动的时间；

v_t ——末速度；

v_0 ——初速度。

(三) 功和功率

力所做的功 W 为

$$W = FS \cos \theta$$

式中 F ——力；

W ——力所做的功；

S ——位移；

θ ——力与位移间的夹角。

功率 N 为

$$N = W/t$$

(四) 势能和动能

重力势能

$$E_p = mgh$$

弹力势能

$$E_k = \frac{1}{2} kx^2$$

动能

$$U = \frac{1}{2}mv^2$$

以上式中 g ——重力加速度； h ——物体距地面高度； k ——弹簧系数； x ——弹簧相对平衡位置的位移； v ——物体速度； m ——物体质量。

(五) 热量

$$Q = cm(t_2 - t_1)$$

式中 Q ——热量； c ——物质的比热； t_1 ——初温度； t_2 ——末温度； m ——物体质量。

【例 1-1】 匀加速运动的位移计算。

匀加速运动的位移 S = 匀速运动里程 $v_0 t$ + 变速运动里程 $\frac{1}{2}at^2$

详见图 1-1-1 所示。

自由落体运动是最典型最常见的匀加速运动。此时加速度 $a = g$ ，重力加速度 $g = 9.80665\text{m/s}^2$ ，当 $v_0 = 0$ 为自由落下。

【例 1-2】 斜抛物运动。抛物运动图见图 1-1-2。

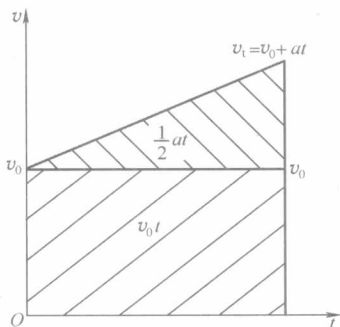


图 1-1-1 匀加速运动图

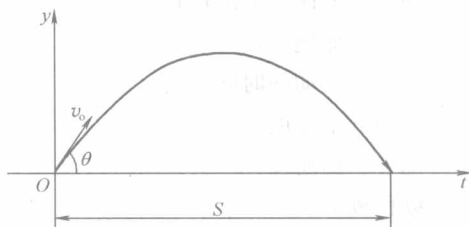


图 1-1-2 抛物运动图

$$y = v_0 t \sin \theta - \frac{1}{2}gt^2$$

$$x = v_0 t \cos \theta$$

最高处速度的垂直分量 $\frac{dy}{dt} = 0$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{d}{dt} \left(v_0 t \sin \theta - \frac{1}{2}gt^2 \right) = v_0 \sin \theta - gt = 0$$

时间 $t = \frac{v_0 \sin \theta}{g}$ 时物体达最高点。

$$y_d = v_0 \times \frac{v_0 \sin \theta}{g} \times \sin \theta - \frac{1}{2} \times g \times \frac{v_0^2 \sin^2 \theta}{g^2} = \frac{v_0^2 \sin^2 \theta}{2g}$$

最大射程时物体落地 $y=0$

$$v_0 t \sin \theta - \frac{1}{2} g t^2 = 0$$

$$t = \frac{2 v_0 \sin \theta}{g}$$

最大射程 $S = v_0 \times \frac{2 v_0 \sin \theta}{g} \times \cos \theta = \frac{v_0^2}{g} \sin 2 \theta$

求算初速等同射程最远的发射角 θ 为

$$\frac{ds}{d\theta} = \frac{d}{d\theta} \left(\frac{v_0^2 \sin 2 \theta}{g} \right) = \frac{v_0^2}{g} \times 2 \times \cos 2 \theta = 0$$

$$\cos 2 \theta = 0, 2 \theta = 90^{\circ}, \theta = 45^{\circ}。$$

二、物性

(一) 材料的硬度

材料的硬度可以用抗刻划或抗压痕（布氏试验）来确定。

刻划硬度——用莫氏硬度标准来度量。莫氏硬度标准见表 1-1-1。

表 1-1-1 莫 氏 硬 度 标 准

莫氏硬度	硬标物质	莫氏硬度	硬标物质
1	滑 石	6	长 石
2	石 膏	7	石 英
3	方解石	8	黄 玉
4	萤 石	9	刚 玉
5	磷灰石	10	金刚石

硬度标准的使用方法：若某种物体能够刻伤硬度低于 3 以下的各种物体，而又能被 4 以上的物体刻伤，则该种物体的硬度为 3.5。

表 1-1-2 各种材料的莫氏硬度

名 称	柏油	铅	石膏	金	铜	黄铜	铁	玻璃	钢	磁铁矿	铂铱合金	电气石	金刚砂
莫氏硬度	1~2	1.5	2	2.5~3	2.5~3	3~4	4~5	4.5~6.5	5~8	6	6.5	7.3	9.8
名 称	锌	硫黄	铝	银	大理石	荧石	铂	石棉	正长石	铌	石英	绿宝石	
莫氏硬度	1.2	1.5~2.5	2	2.5~3	3~4	4	4.3	5	6	6	7	7.8	

(二) 铁热温度色

表 1-1-3 铁 热 温 度 色

色 别	温 度 (℃)	色 别	温 度 (℃)
在黑暗中呈暗红色	525	白	1300
在黑暗中呈樱桃红色	850	可 烧 焊	1350~1450
在黑暗中呈亮红色	950	白 热 带 火 花	1500
橙 黄 色	1100		

(三) 物质的冰点、熔点、沸点

1. 物质的冰点

表 1-1-4 物质的冰点 (°C)

物质	水	水银	二氧化碳	酒精	氮	氧	氢	氦
冰点	0	-38.9	-57	-130	-214	-227	-257	-272

2. 在标准大气压下物质的熔点

表 1-1-5 在标准大气压下物质的熔点 (°C)

物质	氧	氮	乙醚	酒精	冰	氨	水银
熔点	-218.8	-210	-117	-114	0	-77.7	-38.8~-30
物质	甘油	松节油	海水	石蜡	橡胶	锡	铅
熔点	-20	-10	-2.5	47~54	125	232	327
物质	锌	铝	银	黄铜	金	铜	白铸铁
熔点	419.5	658	961	1000	1064	1073~1083	1200
物质	钢	纯铁	铂	钨	碳	硫	食盐
熔点	1300~1400	1530	1774	3370~4370	3500	115	772

3. 在标准大气压下物质的沸点

表 1-1-6 在标准大气压下物质的沸点 (°C)

物质	氮	空气	氧	甲烷	二氧化碳	氯
沸点	-209.6~-196	-193	-218~-183	-161.5	-78.5	-34
物质	乙醚	甲醇	苯	松节油	甘油	石蜡
沸点	35	64.7	80.2	160	290	300
物质	水银	锌	食盐	铈	铅	铝
沸点	357	907	1416	1635	1755	1800
物质	银	锡	铜	铁	金	金刚石
沸点	1955	2275	2360	2450	2500	4200
物质	铂	钨	硫黄	水		
沸点	4300	5900	445	100		

(四) 物质的比热

表 1-1-7 物质的比热

物质	水	玻璃	康铜	铈	水银	铂
比热	1.000	0.156	0.10	0.05	0.033	0.032
物质	石蜡	钢	紫铜	酒精	铸铁	锌
比热	0.67	0.115	0.094	0.60	0.113	0.094
物质	松节油	镍	黄铜	钨	锡	铝
比热	0.42	0.11	0.092	0.032	0.064	0.031
物质	碳	青铜	金	石墨	锰铜	银
比热	0.204	0.10	0.03	0.20	0.10	0.056
物质	铋	钼	镍铬			
比热	0.03	0.06	0.11			

注 康铜成分—铜 58.8%+镍 40%+锰 1.2%。

(五) 金属的温差电动势

表 1-1-8 金属——铂电偶温差 100℃ 的温差电动势 E

名 称	E (mV)	名 称	E (mV)	名 称	E (mV)
铈	+4.00	银	+0.74	水银	-0.07
软铁	+1.886	锌	+0.698	镍	-1.496
硬铁	+1.873	锡	+0.44	康铜	-3.43
钨	+0.79	铅	+0.443	铅	-6.31
金	+0.778	镁	+0.434		
铜	+0.75	铝	+0.41		

注 正号表示电流在 0℃ 的接头处由金属流向铂。

(六) 绝缘体电阻率 ρ

表 1-1-9 绝缘体电阻率 ρ (Ω·m)

绝缘体	石 板	纤 维	瓷	赛璐珞	玻 璃
ρ	1×10 ⁶	5×10 ⁷	1×10 ⁸	2×10 ⁸	5×10 ¹¹
绝缘体	云 母	虫 胶	硫	胶 木	琥 珀
ρ	1×10 ¹³	1×10 ¹⁴	1×10 ¹⁵	1×10 ¹⁶	3×10 ¹⁶

(七) 石料

花岗岩——属火成岩，抗化学侵蚀能力强。灰色、深红色的花岗岩较为耐久。花岗岩耐火性弱。我国花岗岩分布甚广。著名产地有山东青岛、泰山。

石灰岩——是制水泥和石灰的主要原料，其耐火性比花岗岩强。颜色随其所含杂质而异，以暗褐色、蓝灰色居多。

玄武岩——属火成岩，颜色深黑，组织细密坚实，具有高度的耐磨性，能耐高温、硬度高。开采困难。

砂岩——属水成岩，有灰绿色及淡红色，由胶合料胶合而成。胶合料以二氧化硅为优，碳酸钙次之。

1. 石料性质

表 1-1-10 石料性质表

种类	抗压强度 (kgf/cm ²)	抗弯强度 (kgf/cm ²)	抗剪强度 (kgf/cm ²)	强性系数 (10 ⁵ kgf/cm ²)	密度	膨胀系数 (10 ⁻⁷ /℃)	硬度 (秀尔数)	吸水率重量 百分比	耐用 年数
花岗岩	1100~2100	85~150	130~190	4.2~7.0	2.6~3.0	34~118	51~104	0.2~1.17	75~200
石灰石	280~1400	18~200	70~140	2.8~10.0	2.6~2.8	30~112	28~96	0.1~0.6	20~40
砂石	500~1400	35~140	85~180	0.7~5.3	2.5~2.7	67~116	22~86	0.7~13.8	50~200

注 1kgf/cm²≈0.1MPa。

2. 按吸水率和容重决定石料近似标号

表 1-1-11 吸水率、容重、石料近似标号表

6 个试件吸水率 (%)	容重 (kg/m ³)	石料近似标号
2	>2500	800
3.5	2400	600
5	2350	400
10	2150	200
大于 10	1900	100

三、力学

(一) 力的三要素

力的三要素为方向、大小和着力点。

经常以箭头的方向表示力的方向，以箭头的长短表示力的大小（模量），而以箭尾表示着力点，或者箭头穿过着力点。

因为力是向量，为与标量（非向量）相区别，在其模量之上注以箭头或圆点，例如 $\vec{F}$ 或 $\dot{F}$ 。又因为力是向量，所以它服从向量加减法则和合成分解法则。

(二) 力的合成与分解

将各力合成为一个等效的力称为力的合成，这个力称为合力。相反，将一个力分解为若干个与之等效的力，称为力的分解。在实际工作中往往将一个力分解为两个互相垂直的分力，因为这样方便计算和应用。例如利用爬杠装卸车时，就是将重力分解成沿爬杠方向的分力和垂直爬杠的正压力，以便求算装卸牵引力和对爬杠的正压力，从而计算摩擦力。

(1) 合成第一法——多边形法。

将各力首尾依次相接，由第一力的尾端到最末力箭首便是合力。如果合力等于零，则称为力的平衡。

(2) 合成第二法——平行四边形法。

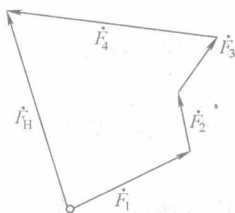


图 1-1-3 多边形法

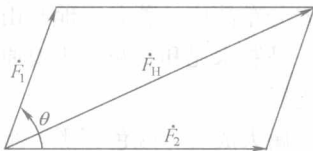


图 1-1-4 平行四边形法

两个共点力 F_1 与 F_2 的合力 F_H 就是这两个力组成的平行四边形的对角线。公式表示为

$$F_H = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2\cos\theta}$$

(3) 合成第三法——直角坐标法。

将诸力 $F_1, F_2, F_3, \dots, F_n$ 都分解成横向与 x 轴平行的分力 $F_{1x}, F_{2x}, F_{3x}, \dots, F_{nx}$ ；又分解成与 y 轴平行的 $F_{1y}, F_{2y}, F_{3y}, \dots, F_{ny}$ 。

$$\text{则合力的模量 } F_H = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n F_{ix}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n F_{iy}\right)^2}$$

$$\text{合力的方向角度 } \alpha = \arctg \frac{\sum_{i=1}^n F_{iy}}{\sum_{i=1}^n F_{ix}}$$

仔细观察便会发现：在送电线路的实际应用中，既有立体空间力系，也有平面力系和共点力系。门形杆的起立是一个空间力系。本手册第七章就是利用对称性，将空间力系简化为一个平面力系，又将平面力系进一步简化成为由吊力、重力和支点反力组成的三力平面力系，从而简化方便了计算。

在“共点静力学”中只要合力为零，便是力的平衡。而在“刚体（非共点）静力学”中要达

平衡, 尚应加一条: 对某点“O”的左倾力矩等于右倾力矩。

即 $\sum F_x = 0 \quad \sum F_y = 0 \quad \sum M_O = 0$

在实际计算中 $\sum M_O = 0$ 的回转点“O”常取为某力的着力点, 因为这样可以简化计算。例如求横担支点的反力。

(三) 牛顿三大定律

牛顿第一定律——惯性定律: 若不受外力, 则物体静者恒静, 动者恒动, 而且保持匀速直线运动。

数学表达式: 若 $\dot{F} = 0$, 则 $\dot{U} = \dot{K}$ 。

所谓惯性就是物体不受外力时, 有保持其原有速度不变的特性。

牛顿第二定律——动量冲量定律: 物体受到外力则产生加速度, 其加速度 $\dot{a}$ 与 $\dot{F}$ 的大小成正比, 而且与力同向, 而与物体的质量成反比。

数学表达式: $\dot{F} = m\dot{a}$

冲量动量表达式是: 动量变化 $d(mv) = \text{外力与时间之积 } Fdt$

牛顿第三定律——作用反作用定律: 作用力与反作用力成双成对的同时存在, 而且大小相等, 方向相反, 在一条直线上, 又分别作用在两个物体上。数学表达式为 $\dot{F}_{12} = -\dot{F}_{21}$

(四) 摩擦力与摩擦系数

1. 摩擦系数

物体移动时其摩擦力与正压力成正比。最小拖动力 $P = W \cdot f$ 。式中, W 为物重; f 为摩擦系数。

若将物体放在与水平成 θ 角的平面上, 而且不断增加 θ 角, 终有一个角度 θ_f 物体开始下滑, 这时下滑力等于摩擦力, 下滑力 $P = W \sin \theta_f$, 摩擦力 $T = f \cdot W \cos \theta_f$ 。所以有

$$W \sin \theta_f = f \cdot W \cos \theta_f$$

$$f = \tan \theta_f$$

正切角度是摩擦系数的角度叫做“摩擦角”。材料间的摩擦系数详见本手册第四章。

2. 省力搬运

【例 1-3】 上提物体搬运时, 虽无摩擦力但上提力等于物重, 如平向拖动虽无上提力, 但要克服摩擦力, 问有无某 θ 角最为省力?

解

$$f(W - P \sin \theta) = P \cos \theta$$

$$P = \frac{W \cdot f}{f \cdot \sin \theta + \cos \theta}$$

由微积分知识得知:

$P' = 0$ 便可求得最小驱动力 $P_{\min}$

$$P' = \frac{0 - W \cdot f(f \cdot \cos \theta - \sin \theta)}{(f \cdot \sin \theta + \cos \theta)^2} = 0$$

$$f \cdot \cos \theta - \sin \theta = 0 \quad f = \tan \theta$$

结论: 驱动力 P 与水平构成摩擦角时最为省力。因为

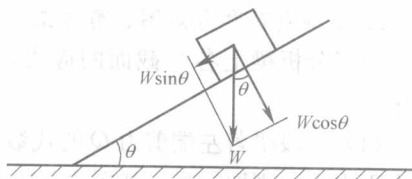


图 1-1-5 摩擦力与正压力示意图

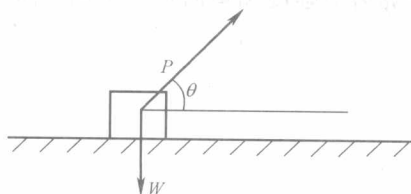


图 1-1-6 平向拖动示意图