

摄影理论及其应用



[日]堀高夫 村山茂明 著

张育民 李世超 霍风 编译

叶金俊 蔡为茂

关承儒 校

中国林业出版社

悬索理论及其应用

张育民 李世超 霍 风 编译
叶金俊 蔡为茂
关承儒 校

中国林业出版社

(京)新登字 033 号

悬索理论及其应用

张育民 李世超 霍 风 编译
叶金俊 蔡为茂
关承儒 校

中国林业出版社出版(北京西城区刘海胡同7号)

新华书店北京发行所发行 昌黎县印刷厂印刷

787×1092毫米 32开本 9.625 印张 208 千字

1992年5月第一版 1992年5月第一次印刷

印数1—1000册 定价:5.50元

ISBN 7-5038-0915-9/TB·0205

前 言

我国的林业架空索道由于发展历史较短，索道悬索理论方面的研究略显不足，缺少加深拓宽悬索理论研究方面的指导性资料和书籍，有关人员难于全面了解现有索道类型的悬索计算理论。为此，我们编译了这本《悬索理论及其应用》，供有关科研、教学、工程技术人员参考。

《悬索理论及其应用》在概述悬索基本理论的基础上，对现有应用中的悬索理论所存在的不足之处作了补充和引伸，并着重对集材索道的一些具体问题进行讨论。为应用和研究集材索道的悬索理论提供了较系统的指导性的理论依据。

《悬索理论及其应用》主要译自《架空索の理論とその応用》(昭和 49 年 12 月)一书，内容主要有抛物线悬索理论、悬垂线悬索理论、集材索道诸问题的解法、多跨集材索道有关问题*、钢索的损耗及其检验、集运材索道工作索受力计算、承载索受力测试等。本书在叙述上采用深入浅出的方式，以大量的计算实例帮助读者理解和掌握书中所提出的理论依据及计算公式。使读者能有较大的理论提高，又能方便地进行理论计算式的实际应用。由于本书侧重于理论问题方面的探讨，其各部分的独立性较大，没有完整的设计程序可直接套用。因此读者必须对有关计算实例进行全面的掌握，根据生产或科研的实际情况，参照文献[20]或其他有关计算程序来完成设计计算工作。

* 这部分由编译者张育民根据自己的研究成果写成并编入该书。

本书的一个主要特点是解决原有理论所存在的不足。如：著者针对悬索理论尤其是集材索道的悬索理论所面临的一些力学问题，提出一系列实用计算式；提出新的补正计算方法，弥补加藤氏原有方法在应用上的不足；注意从改善理论适应性的角度入手，给出适宜Y型索道等特殊形式集材索道应用的设计计算方法。同时，编译者对多跨集材索道设计计算中存在的一些问题作了探讨。

本书由福建林学院张育民、伊春林业管理局李世超、霍风和永安林业局叶金俊、蔡为茂编译，东北林业大学关承儒教授校。由于我们的水平有限，书中难免有不妥之处，敬请读者指正。

编译者

目 录

第 1 部 [日]堀 高夫、张育民

序 言	(3)
第 1 章 抛物曲线悬索理论	(7)
§ 1 无荷悬索的公式	(8)
§ 2 多跨悬索的线形	(13)
§ 3 单荷重悬索的公式	(14)
§ 4 多荷重悬索的公式	(22)
a) 通用式的推导(22) b) 等间隔作用等量集中荷重的场合(30) c) 承受任意分布荷重的悬索通用式(32) d) 荷重点的轨迹(38)	
§ 5 承载索的设计	(40)
a) 设计计算步骤(40) b) 根据当量挠度系数均布荷重法计算最大张力(42) c) 依轮压张力比、荷重点挠度的约束条件求无荷挠度系数、钢索直径及许用荷重(48)	
§ 6 补正理论	(53)
a) 挠度系数的补正(53) b) 补正系数计算式的推导(55)	
§ 7 承受倾斜荷重的悬索	(61)
a) 计算式的推导(61) b) 随荷重倾斜角的变化, 各量的一般变化趋势(68) c) 计算结果的精度(72)	
第 2 章 悬垂曲线悬索理论	(74)
§ 1 基本公式	(74)
a) 基本公式的推导(75) b) 两支点等高时的悬	

	索问题(77)	c) 双曲线函数的公式(80)
§ 2	关于悬索曲线的公式 (82)	
	a) 索长、支点坐标及自 y 轴开始的曲线长公式(83)	
	b) 两支点不等高时的悬索问题(85)	c) 悬索曲线的重心位置与平均张力(89)
§ 3	荷重索的解法 (92)	
	a) 已知上支点张力 T_B 及荷重点挠度 f_D 的场合(93)	
	b) 已知荷重 P 和索长 L 的场合(96)	
§ 4	近似公式 (99)	
	a) 悬索曲线的近似公式(100)	b) 荷重索的近似公式(103)
第 3 章	集材索道诸问题的解法 (107)	
§ 1	应用悬索理论模型、近似模型的实用解法 (107)	
	a) 固结式跑车的索道模型与轮式跑车的索道模型(108)	b) 应用近似模型的解法(109)
§ 2	精确解法(力矩法) (115)	
	a) 力矩法原理及力矩法的公式(115)	b) 计算方法(118)
	c) 悬索线段的诸公式(120)	
§ 3	工作索张力问题 (121)	
	a) 起重索的张力(121)	b) 回空索的张力(124)
	c) 闭合循环索的张力(128)	
§ 4	集材索道的许用荷重 (131)	
	a) 悬索的举升力(132)	b) 许用荷重的计算式(136)
	c) 轮压张力比与荷重点挠度间的关系(140)	
§ 5	带广式(运行式)集材索道 (141)	
	a) 精确算法的概要(142)	b) 闭合循环索张力的各种变化趋势(143)
	c) 应用假想索模型的实用算法(146)	d) 闭合循环索的最大张力、荷重、荷重点挠度之间的关系式(149)

§ 6	Y 型索道的问题	(152)
	a) 结合点的挠度与张力水平分力的关系	(154)
	b) 精确计算法	(156)
	c) 应用半等价索道的实用计算法	(161)
	d) 负荷状态改变时张力、荷重点挠度等的变化趋势	(165)
	e) 实用计算值的精度	(169)
第 4 章	多跨集材索道有关问题	(172)
§ 1	多跨集材索道的承载索张力	(173)
	a) 加氏法在我国的应用情况	(173)
	b) 多跨悬索张力计算式的推导	(175)
	c) 补正计算法实用性考察	(181)
§ 2	鞍座下沉对荷重轨迹的影响	(190)
	a) 吊索工作状况分析	(191)
	b) 影响量计算式的建立	(193)
	c) 影响量计算式的使用	(196)
§ 3	加杜两法有关问题的比较	(201)
	a) 升角计算式问题	(201)
	b) 承载索漂起检查的问题	(205)

第 2 部

[日]村山茂明

第 1 章	钢索的损耗及其检验	(215)
§ 1	钢索损耗	(215)
	a) 断线	(215)
	b) 磨损	(217)
	c) 扭结	(220)
	d) 腐蚀及其他	(220)
§ 2	钢索的寿命判定法	(221)
	a) 钢索的使用情况记录卡	(221)
	b) 钢索的电磁探伤法	(222)
	c) 结论	(240)
第 2 章	牵引索及集材索道的工作索	(243)
§ 1	架空索道的牵引索	(243)
	a) 概论	(243)
	b) 牵引索的张力	(244)
§ 2	集材索道的工作索	(263)
	a) 以往的设计法	(263)
	b) 设计法中存在的问题	(271)

第 3 章	承载索的检测	(278)
§ 1	支点倾角法	(278)
	a) 悬索张紧度的检测(278) b) 负荷索张力概算法 (280)	
§ 2	振动波法(敲击法)	(281)
	a) 悬索张紧度的检测(281) b) 张力测定法(286) c) 根据无荷平均张力推算最大张力的方法(288)	
§ 3	张力计测定法	(289)
	a) 直接安装在静态索上的测定方法(289) b) 使绳 索弯曲而进行测定的方法(293) c) 弯曲部分绳索而 进行测定的方法(293)	
参考文献		(296)

第 1 部

[日] 堀 高夫、张育民

序 言

悬空架设的绳索在其自重的作用下产生弯曲，呈现出某种曲线线形。我们将这样一种被悬吊在两支点上，支撑着自重及横向荷重的绳索称为悬索。在运材索道、集材索道等林用索道设施中，承载索、牵引索及各种工作索均是以悬索的形式而起作用的。有关这样悬索的张力、线形、挠度等的静力学理论称为悬索理论。

严格说，钢索一类实物索的单位长度自重是不可能完全均匀的，且必须施加外力才能使其弯曲，由于对钢索施加张力还将引起其弹性伸长。不过，在悬索理论里是将钢索假设为单位长度自重均匀、抗弯力矩为零，且无弹性伸长的理想化物体。在此假设前提下，悬索所形成的曲线即是所谓的悬垂曲线。

悬索理论里，有精确地视悬索曲线的线形为悬垂曲线的悬垂线理论，也有近似地将悬索线形视为抛物曲线的抛物线理论。上述两种理论的曲线方程式是长期以来人们所凭借的计算理论式。

设计索道等悬索设施时，必须知道除自重外的外加任意荷重作用下负荷索的张力、荷重点挠度等的情况。生产实际中的悬索分为定索长式和定张力式两种。定索长式的悬索其两端固定，负荷的大小、作用形式不影响其绳索长度，而张力却随负荷状况的变化而变化。定张力式的悬索由于平衡配重自动调整装置的作用，张力始终保持在一定值上，而索长

则随负荷状况的变化而变化。

定索长式的悬索是一超静定的结构，对其进行静力学范围的分析时，不仅要考虑力的平衡条件，还要考虑“定索长条件”这一微妙的几何条件，所以问题相当复杂。另外还有因绳索的弹性伸长、环境温度变化等原因引起的微小的索长变化进而影响悬索的张力等各种各样相当麻烦的问题。

从力学的角度上说，将索道的承载索、牵引索设计成定张力式较合适，所以通常的索道大都是将上述两种索设计成定张力式。相对而言，林用索道大多是临时性的，各种设施在满足生产的前提下都尽可能设计成简易形式，所以承载索基本上采用定索长式，闭合循环牵引索也是定索长式居多。

日本以林用索道的设计为目的进行的悬索研究，其历史也是悠久的，而且在过去的林业工程学（森林利用学）研究成果中占有相当大的部分。其研究主要是集中于定索长式的承载索方面。在众多的研究成果中，西垣晋作博士、笈名孝太郎博士、渡边治人博士、加藤诚平博士的下述成果最为优秀。即

1) 西垣晋作 (1919)。铁索的理论及计算法。日林誌，1、2、3；

2) 笈名孝太郎 (1934~1937)。关于林业索道的静力学问题新解法。东大演报，19、21、23；

3) 渡边治人 (1935)。交错式索道绳索的曲线长度及张力的静力学研究。九大演报，7；

4) 加藤诚平 (1955)。关于运材索道承载索设计与检测的研究。东大演报，49。

上述的1)~3)是应用悬垂线理论的有关研究，而悬垂线理论中关于负荷索的各量须从含有几个未知数的一连串

方程式求得。西垣博士通过对一部分计算进行近似处理，给出了无需应用试算法即可求未知量的方法；筈名博士则通过巧妙的变形使之成为只含一个未知数的一连串条件式，给出了用试算形式求未知量的方法。而且筈名博士还提倡用基本形表达各量，给出了应用近似公式的解法；渡边博士应用牛顿的渐近算法，给出了精确解析由承载索、牵引索组成的复线式索道问题的方法。

相对而言，加藤博士却是从实用的观点出发，选抛物线理论作为基础理论，基于各种实验结果推导出了适合林用索道现状的承载索设计法。其后，这一设计法在林用索道的设计中得到迅速推广应用。而且，在理论和实验两方面关于悬索研究的辉煌成果也层出不穷。另外，加藤博士的专著。

加藤诚平（1959）《林业索道设计法》（金原出版）堪称日本林用索道最优秀的指导书，所以至今还继续再版。

最近，随着林用索道中集材索道重要性的日益增大，集材索道力学问题的复杂性也随之突出。悬索理论今后面临的首要问题是提高对集材索道的适应性，因此有必要详细地研究承载索与工作索间的相互作用。目前，新的集材索道的种类不断出现，诸如Y型集材索道、运行式集材索道等特殊索道，这都需要分别研究其独特的设计计算方法。

近来，电子计算机的应用也已开始进入悬索的研究领域。本书为此而列举了几个电子计算机的计算结果。可以预言，在不久的将来电子计算机将是设计特别复杂索道时所不可缺少的工具。不过，即使到了这个阶段，用明瞭的形式表示各种复杂关系的实用计算式仍不失其价值。也就是说，要有效地进行电子计算机的运算，多数情况下需先设定未知量的近似值，而实用计算式在这方面就能发挥其优势。另外，

从计算机虽可得到必需的诸量值，但要了解诸量的变化趋势尚需分析涉及广泛范围的庞大的计算结果。根据笔者的经验认为，实用计算式作为分析的补助手段是极其有效的。

本书的重点是提出设计中所使用的各公式的理论依据。另外，为阐述解决目前尚悬而未决定的各种问题，提出本人认为必要的基础理论的全貌。第1章的“抛物线悬索理论”是在加藤博士的理论基础上增添进笔者研究引伸的结果。第2章的“悬垂线悬索理论”是集中了笔者对众多前辈、学友研究成果的学习心得。因此在叙述过程中一般未指出成果的来源。第3章的“集材索道诸问题的解法”主要叙述笔者与研究合作者最近探讨的几个问题。

堀 高夫

第 1 章 抛物曲线悬索理论

严格说，绳索的自重是沿其长度均匀分布的垂直荷重。不过因张得相当紧的绳索其线形成为极其接近直线的平缓曲线，所以当采用图 1-1 中的 x 、 y 坐标轴时，绳索的自重可以视为沿 x 轴方向均匀分布的垂直荷重。此时绳索所形成的曲线，理论上成为抛物曲线。由于进行了近似的假设，就可使用简单且直观性的公式来表示绳索的张力、挠度等。

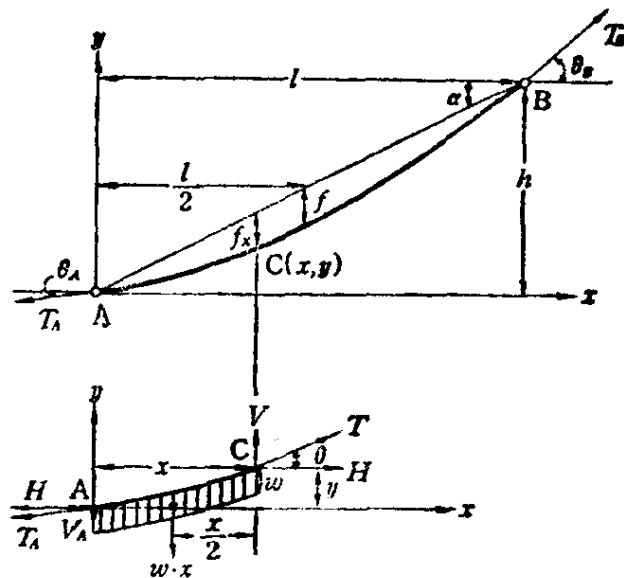


图 1-1 无荷抛物线悬索

一般情况下，绳索是在张得较紧的状态下进行作业，因而除特殊的场合外，构成索道的各索的线形可以说十分接近于抛物线。抛物线悬索理论是一种以实用为目的的理论体系，此理论除将索线线形视为抛物线外，并适当地进行了近似处

理，用简单明了的形式来表达各个量的计算式。

§ 1 无荷悬索的公式

图 1-1 所示为悬挂在 A、B 两点间长为 L 、单位长度自重为 p 的悬索。设 AB 的水平距离为 l 、高差为 h 、弦线 $\overline{AB}$ 的倾斜角为 α ，同时视绳索的自重是均匀分布在 x 轴上，则 x 轴上单位长度的载荷为：

$$w = \frac{p \cdot L}{l} = \frac{p \cdot u}{l} = p \cdot \sec \alpha \quad (1)$$

在绳索曲线上选取一任意点 C (x, y)，则点 A 处的张力为 T_A ，点 C 处的张力为 T ，AC 间的索重 $w \cdot x$ 等作用力平衡。此时的张力 T_A 可分解成水平力 H 和铅直力 V_A 。由 AC 间的作用力对 C 点取力矩可得下式

$$H y - V_A x - (w x) \frac{x}{2} = 0 \quad (2)$$

令上式的 $x = l$ 、 $y = h$ 得

$$H h - V_A l - \frac{w \cdot l^2}{2} = 0 \quad (3)$$

从 (2)、(3) 式消去 V_A ，就得到悬索曲线的方程式

$$y = x \cdot \operatorname{tg} \alpha - \frac{w}{2 H} (l - x) x \quad (4)$$

此状态下的悬索曲线线形为抛物线。

如果求曲线上任意点到弦线 $\overline{AB}$ 的纵坐标距离——挠度，则有

$$f_x = x \cdot \operatorname{tg} \alpha - y = \frac{w}{2 H} (l - x) x \quad (5)$$

当 $x = l / 2$ 时得到跨距中央的挠度