

文章编号: 1000-7598-(2005) 07-1113-05

加固膨胀土路堑边坡中框架梁的内力计算

吴礼舟, 黄润秋

(成都理工大学 地质灾害防治国家专业实验室, 成都 610059)

摘要: 锚杆框架梁是一种较好的加固膨胀土路堑边坡方式, 但其设计理论依据仍不统一, 未形成成熟的规范, 多依靠工程经验。Winkler 地基梁和半无限弹性体理论被用来计算框架梁的内力, 在 Winkler 假设的前提下, 着重分析了现浇梁和预制梁在不同长度条件下的内力分布。结果表明: 框架梁的设计完全依据膨胀力是欠合理的, 建议采用 Winkler 地基梁和半无限弹性体理论计算框架梁的内力, 并结合工程实例, 提出了相关的建议。

关键词: 锚杆框架梁; 内力; 膨胀土路堑边坡; Winkler 假设

中图分类号: TU 441

文献标识码: A

Calculation of internal forces of frame beam for strengthening expansive soil roadcut slope

WU Li-zhou, HUANG Run-qiu

(National Laboratory of Geological Hazard Prevention and Geological Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, 610069, China)

Abstract: Anchor frame beam is a good method for strengthening the expansive soil roadcut slope. However its design theory is still not uniform and there is no any code to be followed. Engineering experiences are important for the design of anchor frame beam. The assumption of Winkler foundation beam and semi-infinite elastic theory are used for calculating the internal forces of anchor frame beams. The internal force distributions of different length beams are analyzed. The results show that it is illogical to design the frame beam just by expansive force. It is suggested that the internal forces of anchor frame beam to be calculated with Winkler foundation beam and semi-infinite elastic theory. At the same time the pertinent proposal for designing frame beam is offered based on an actual project.

Key words: anchor frame beam; internal force; expansive soil roadcut slope; Winkler assumption

1 引言

膨胀土作为一类特殊土, 以“膨胀性”、“裂隙性”和“超固结性”三性危害公路边坡的稳定性。膨胀土路堑边坡易出现浅层滑坡。混凝土框架梁通过锚杆嵌固在土体上, 整体性好, 刚度大, 又兼顾绿化, 突破了传统的片石等刚性防护在绿化方面的欠缺。锚杆的作用是嵌固未风化的膨胀土, 固定框架。框架梁约束边坡土体, 阻止其位移, 尤其是水平位移, 防止膨胀土浅层的开裂, 有利于改善边坡浅层应力分布, 使土体的整体强度得以提高。

锚杆框架梁的设计关键是锚杆尺寸、锚杆间距和锚杆长度的选择。锚杆框架梁的设计仍没有形成可遵循的规范, 其设计理论依据也各不相同, 不同

方法计算出的内力也有在较大差异。锚杆框架梁在工程中应用较广, 理论上却一直未见有深入的研究, 文献[1]中框架梁设计依据是膨胀力, 根据膨胀力来计算框架梁的内力, 但忽略了边坡土体对框架梁的土压力以及框架梁的自重。本文采用 Winkler 假设和半无限弹性体理论计算框架梁的内力, 并结合工程实例进行了分析。

在锚杆框架梁的施工过程中, 框架梁通常采用现场浇注或预制, 其中预制有两种形式, 见图 1。框架平面布置有矩形、菱形等。本文将 Winkler 假设和半无限弹性体理论计算现浇和预制两种情况下框架梁的内力, 并比较了不同长度的框架梁的内力分布情况, 为锚杆框架梁的优化设计提供参考。

收稿日期: 2004-02-25

修改稿收到日期: 2004-08-13

基金项目: 国家自然科学基金“西部生态与环境”重大研究计划资助项目 (No. 90102002)。

作者简介: 吴礼舟, 男, 1975 年生, 博士, 主要从事地质工程方面的研究工作。E-mail: wulizhou99@sohu.com

2 内力计算

2.1 Winkler 假设条件下的计算方法

框架梁的计算采用 Winkler 假设, 认为框架梁的反力和垂直边坡方向的下沉或位移成正比, 即 $p = ky$ 。其中 y 为框架梁的挠度; k 为 y 方向的基床系数; p 为框架梁受到的反力。

采用 Winkler 假设计算的弯矩和剪力计算公式^[2]如下:

$$M = 4EI\beta^2 y_0 F_3(\beta x) + 4EI\beta\theta_0 F_4(\beta x) + M_0 F_1(\beta x) + Q_0 F_2(\beta x)/\beta - 2PF_2[\beta(x-L)]/\beta \Big|_{x>L} - 2PF_2[\beta(x-2L)] \Big|_{x>2L} \quad (1)$$

$$Q = 4EI\beta^3 y_0 F_2(\beta x) + 4EI\beta^2 \theta_0 F_3(\beta x) - 4\beta M_0 F_4(\beta x) + Q_0 F_1(\beta x) - 2PF_1[\beta(x-L)] \Big|_{x>L} - 2PF_1[\beta(x-2L)] \Big|_{x>2L} \quad (2)$$

式中 y_0 和 θ_0 分别为 $x=0$ 时的挠度和转角; M_0 和 Q_0 分别为 $x=0$ 时的弯矩和剪力, $x=0$ 处的边界条件可确定 M_0 和 Q_0 ; y_0 和 θ_0 可由另一端的边界条件确定。 F_1 , F_2 , F_3 和 F_4 可查文献[2]的附表 12。

实际边坡工程防护中的框架梁受到自重力和锚杆(索)拉力, 边坡体的垂直反力和梁底面的摩擦阻力, 为便于分析, 本文亦不考虑梁的自重和梁底的摩擦阻力, 并假定锚杆拉力均为一定值 F , 其中对于菱形的框架梁, 采用力矩分配法得到:

$$P = F/4。$$

锚杆施加在预制框架梁上拉力有两种形式: 梁中心受拉力和两端受拉力。其长度 L 范围多为 1.5~2.5 m, 见图 1。在图 1(a) 中, 锚杆孔位于预制框架梁的中心位置, 即梁中心受集中荷载。本文采用 $L = 2.5$ m, $\beta = 0.465$ m⁻¹, 将 L , β 和相应的边界条件参数代入式 (1) 和式 (2), 得出的弯矩和剪力分别见图 2 和图 3。图 1(b) 为两端连接锚杆的预制框架梁, 其弯矩和剪力分别见图 2 和图 3。图 2 中虚线为中心受集中荷载的弯矩, 实线为两端受集中力的弯矩, 最大弯矩均出现在中心位置 ($x = 1.25$ m), 并且值的大小接近, 只是一个梁底受拉, 另一个梁底受压。图 3 中虚线为中心受集中荷载的剪力, 实线为两端受集中荷载的剪力, 最大剪力均为 $P = F/4$, 但最大剪力出现的位置不同, 中心受集中荷载时最大剪力出现在 $x = 1.25$ m 的中心位置, 而两端承担集中荷载时最大剪力出现在两端。对于中心受集中荷载的梁, 最大弯矩和剪力均

在中心出现, 在相同的锚杆拉力作用下, 两端承担集中荷载的梁受力明显好于中心承担集中荷载的梁。中心位置承担集中荷载的梁不利于优化, 中心位置为锚杆预留孔, 易出现应力集中, 同时在该位置上又受到最大弯矩和最大剪力。因而预制梁建议采用两端承担集中荷载的梁, 这样可改善受力条件, 节约材料。

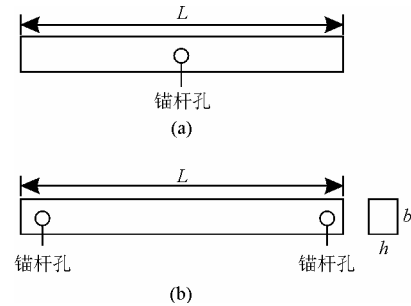


图 1 两种预制框架梁的示意图

Fig.1 Two types of precast frame beams

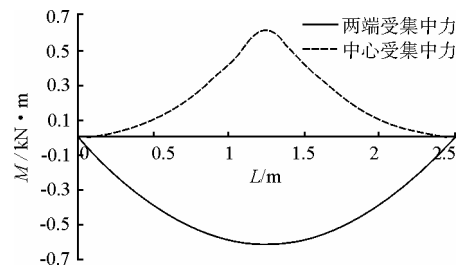


图 2 Winkler 假设计算出预制梁的弯矩图

Fig.2 Bending moment diagram of precast beams with Winkler assumption

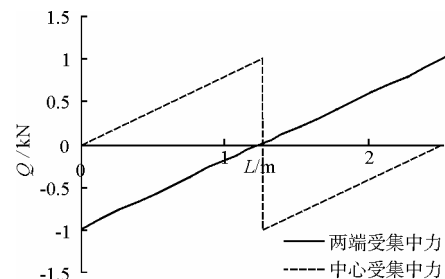


图 3 Winkler 假设计算出预制梁的剪力图

Fig.3 Shear force diagram of precast beams with Winkler assumption

预制梁因为施工灵活而受到欢迎, 而整体现场浇注的梁因整体性好, 优势也很明显。图 4 为不同长度框架梁的弯矩图。连续梁越长 (锚杆间距为定值时), 最大弯矩越小 (见图 4), 当长度为三个跨度 ($3L$) 时, 框架梁的最大弯矩已趋于一定值。框架梁为一个跨度 (预制框架梁的情况) 时, 最大弯矩为 $-0.613P$; 框架梁长度为三个跨度时, 最大弯矩为 -0.526 $4P$, 比一个跨度梁的最大弯矩减小了 14%。图 5 为不同长度梁的剪力图, 在受集中荷载

处的剪力变化不大。这从理论上解释了整体浇注比预制框架梁的效果好, 能降低梁所受的弯矩。对于现场浇注的连续梁的内力计算较为烦杂, 工程中可简化计算。采用一个跨度的简支梁, 算出最大弯矩, 然后乘以一系数, 作为现场浇注的连续梁的最大弯矩, 剪力取简支梁的最大剪力。其内力计算表达式为

$$M = \eta M_{\max} \quad (3)$$

$$Q = Q_{\max} \quad (4)$$

式中 $M_{\max}$ 为一个跨度简支梁的最大弯矩 ($\text{kN}\cdot\text{m}$); $Q_{\max}$ 为一个跨度简支梁的最大剪力, (kN); η 为一系数, 其值与锚杆间距和膨胀力等有关, 一般取 0.85~1.00; M 为实际连续梁的最大弯矩; Q 为实际连续梁的最大剪力。

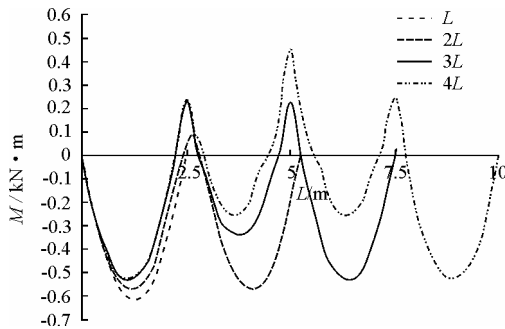


图4 不同连续梁的弯矩图

Fig.4 Bending moment diagrams of different through beams

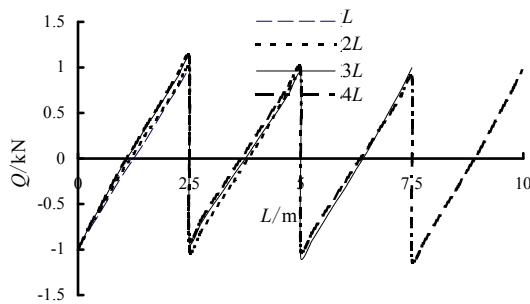


图5 不同连续梁的剪力图

Fig.5 Shear force diagrams of different continuous beams

图6和图7为不同跨度简支梁的弯矩图和剪力图。跨度2.5 m的最大弯矩为 $-0.613 P$, 跨度2 m的最大弯矩为 $-0.496 4 P$, 比跨度为2.5 m的最大弯矩小20%; 跨度为1.5 m处的最大弯矩为 $-0.375 P$, 比跨度为2.5 m的最大弯矩小40%。从框架梁设计的角度来讲, 跨度越短越好。但跨度小, 锚杆的需求量更大, 锚杆的成本较高, 在确保边坡稳定的基础上, 尽可能少用锚杆。因而在优化设计中建议的锚杆间距为2.5 m。

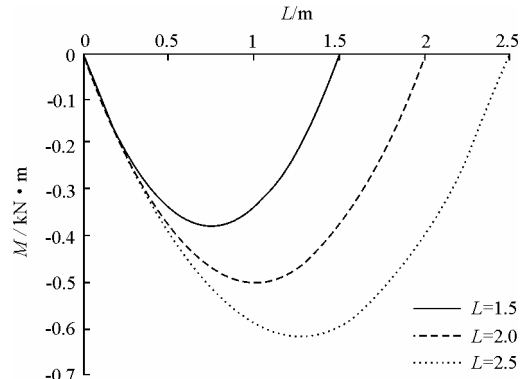


图6 不同跨度梁的弯矩图

Fig.6 Bending moment diagrams of beams with different spans

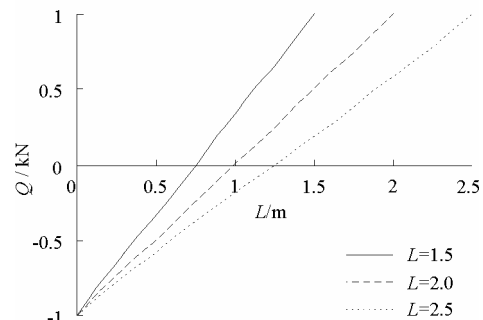


图7 不同跨度梁的剪力图

Fig.7 Shear force diagrams of beams with different spans

2.2 半无限弹性体理论

半无限弹性体理论假设边坡体为均质、连续、弹性的半无限体。主要有级数法和链杆法。框架梁的地基反力使边坡体产生垂直沉降或位移。沉降量可根据弹性理论中弹性半无限体平面体的界面上受集中荷载计算。级数法就是将框架梁的反力用无穷级数(一般取前2项, 也有取前11项, 根据精度而定)表示。由于框架梁满足平衡条件, 静力平衡和力矩平衡能得出反力级数的两个参数, 再由框架梁的挠度方程和沉降量的计算公式结合起来, 计算出相应的参数。弯矩和剪力就能求出。

本文计算采用文献[3]的查表公式。先需要计算柔度指数 $t(t = 10E_0 l^3 / Eh^3)$ 来划分长梁和短梁。 $t < 10$ 为短梁, 受集中力荷载的框架梁的反力、弯矩和剪力的计算公式如下:

任一截面的反力为

$$p = 0.01 \bar{p} P / l \quad (5)$$

任一截面的弯矩为

$$M = 0.01 \bar{M} P l \quad (6)$$

任一截面的剪力为

$$Q = 0.01 \bar{Q} P \quad (7)$$

式中 $\bar{p}$, $\bar{M}$, $\bar{Q}$ 分别为反力、剪力、弯矩的影响系数, 可查文献[3]的表 7-4~7-10; P 为梁受的集中荷载, l 为梁长度的一半。

图 8 和图 9 为不同锚固方式的预制梁的弯矩和剪力。中心受集中力的预制梁在中心位置出现较大的弯矩和剪力。半弹性体理论也说明这种梁不可取。图 10 和图 11 是用不同方法求出的预制梁的弯矩和剪力。半无限弹性体理论计算出的剪力变化不大, 弯矩有一些变化, 这与参数选取有关。因此, 在计算内力时参数的选择也很重要, 必要时还需做现场和室内试验。

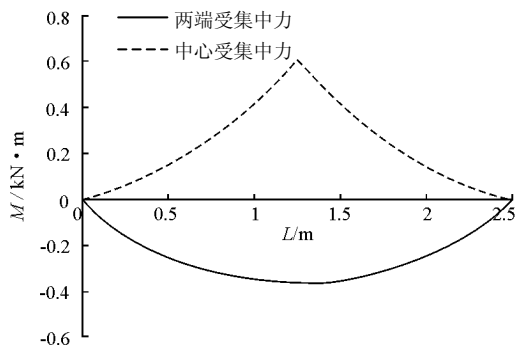


图 8 半无限弹性体理论计算的预制梁弯矩图
Fig.8 Bending moment diagrams of precast beams with semi-infinite elastic theory

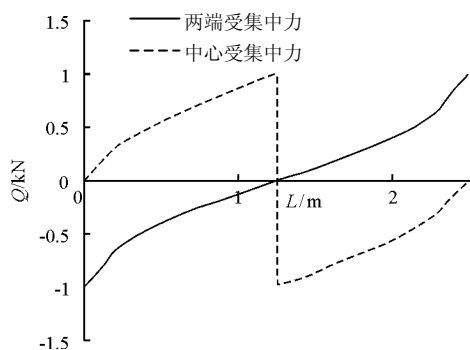


图 9 半无限弹性体理论计算的预制梁剪力图
Fig.9 Shear force diagrams of precast beams with semi-infinite elastic theory

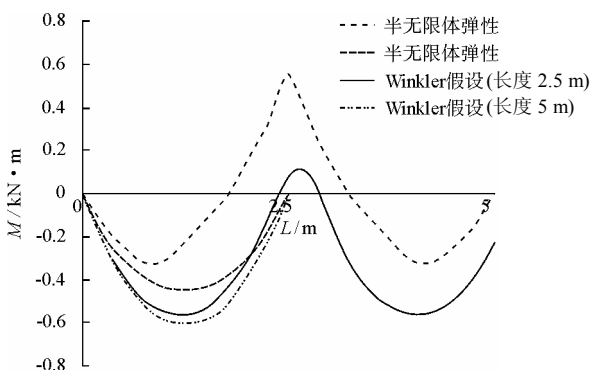


图 10 Winkler 和半无限弹性体法算出的弯矩图
Fig.10 Bending moment diagrams with two methods

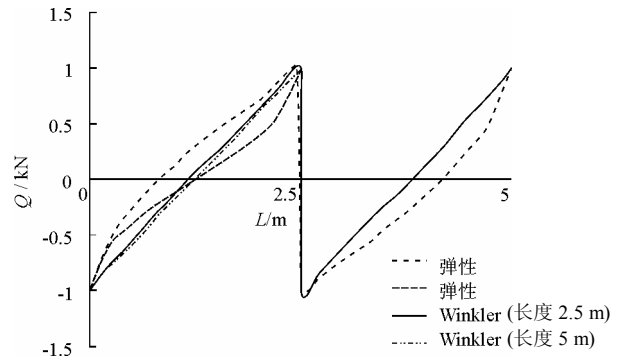


图 11 Winkler 和半无限弹性体法算出的剪力图
Fig.11 Shear force diagrams with two methods

3 工程实例

湖北某高速公路一段膨胀土高路堑边坡采用了锚杆框架梁防护, 框架梁为菱形 (图 12 (a))。膨胀土地区主要由第四系中上更新统、全新统地层构成、其下伏白垩系红色砂岩, 局部地段可见其出露。该工点地表水源较丰富, 膨胀土的成因类型主要表现为残坡积型 (Q_{2-3}^{edl})。主要由棕褐色、黄色低液限粘土及亚粘土组成, 呈硬塑状态, 土中含有少量铁锰结核, 为垅岗地貌, 工点附近的钻孔取得的膨胀土物理和力学性质见表 1。膨胀土的自由膨胀率为 40%~51%, 为弱膨胀土。

为了便于分析, 取两锚杆间的梁为分析对象, 作为简支梁处理 (图 12 (b)), 即采用文中的公式计算。反力可根据推力计算或近似的主动土压力计算公式, 最好以现场的监测资料为主^[4]。在一处框架梁底部监测的土压力为 29.84 kPa。认为土压力是

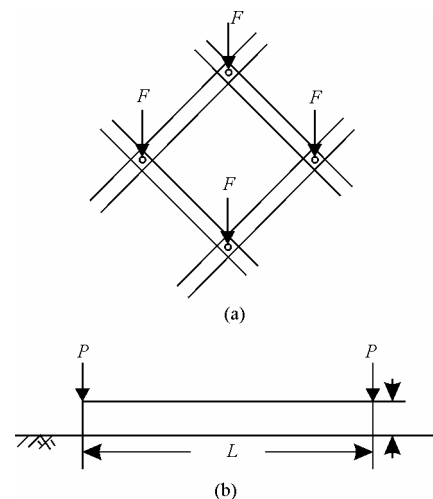


图 12 加固膨胀土边坡框架梁的受力图
Fig. 12 Internal force of frame beam strengthening expansive soil slope

线性分布的^[4]，再根据静力平衡来计算锚杆的拉力，拉力计算值为 74.6 kN，接近锚杆设计值 70 kN。弯矩剪力和反力采用 Winkler 地基梁来计算。 $\beta L = 0.465 \text{ m}^{-1} \times 2.5 \text{ m} = 1.16 > 1$ ，按短梁计算弯矩 M 和剪力 Q （图略）。本文略去了摩擦阻力的影响，

摩擦阻力的影响在文献[5]中已详细的论述。经过 2 个月的监测，框架梁下面埋设的土压力的读数在晴雨天时变化不大，表明在弱膨胀土地区框架梁按照膨胀力来设计是不可取的，设计可不考虑膨胀力的影响。

表 1 钻孔膨胀土的物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of expansive soil obtained from drill

深度 /m	天然含水量 /%	密度 ρ /g · cm ⁻³	孔隙比 e	饱和度 S_r / %	液限 W_L / %	塑限 W_P / %	塑性指数 I_P	凝聚力 c / kPa	内摩擦角 φ / (°)
2.8	34.2	1.87	0.966	97.0	49.0	21.3	27.7	41.7	13.7
4.5	32.8	1.86	0.956	94.0	51.0	23.4	27.6	53.0	23.6
5.7	26.4	1.86	0.862	83.9	54.8	24.5	30.3	65.1	26.4

4 建议和结论

框架梁的设计完全依据膨胀力来设计是欠合理的；框架梁建议采用 Winkler 假设和半无限弹性体理论计算内力。

采用预制框架梁，尽量避免中心位置受集中力。按照锚杆设计的拉力计算出的反力、弯矩和剪力与实际值差异较大，应以实际监测的结果作为计算参数。Winkler 假设和半无限体弹性理论计算出的剪力结果一致，而弯矩有一些差别，因而选择参数很重要，必要时应做相关的现场和室内试验。

采用 Winkler 假设计算梁的内力时，可选取两锚杆之间的梁，并假设为简支梁，采用式（2）计算内力。锚杆间距一般为 1.5 ~ 2.5 m，因锚杆的造价较高，建议锚杆间距尽可能大一些。

锚杆框架梁是一种有效的加固膨胀土路堑边坡技术，在弱膨胀土地区建议不考虑膨胀力对框架

梁的影响。锚杆框架梁防护中的锚杆垂直与边坡体，倾角较大，不同于基坑中的土钉接近水平分布特点，也与边坡中的抗滑桩的竖直分布不同，因而边坡体变形时锚杆既受到边坡体的推力，又受到框架梁的拉力，其内力分布规律和加固机理将有待于深入研究。

参 考 文 献

- [1] 张永防, 王秉勇. 用锚杆框架护坡加固南昆线膨胀土边坡的研究[J]. 铁道工程学报, 2000, (3): 92-95.
- [2] 胡人礼. 桥梁力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999.
- [3] 铁道部第三勘测设计院. 桥梁地基和基础[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991. 252-307.
- [4] 周德培, 张俊云. 植被护坡工程技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [5] 吴礼舟, 胡瑞林, 黄润秋, 等. 护坡格构与坡面相互作用的研究[J]. 工程地质学报, (待刊).



结构振动与控制

（李宏男、李忠献等著 16 开 800 千字 640 页 精装 估价：56.00 元 2005 年 7 月出版）

本书全面论述了结构振动与减振控制两方面的内容，共分 4 篇。第 1 篇介绍了结构动力学的基本原理，单自由度体系、多自由度体系和无限自由度体系的振动，自振特性与动力反应的数值解法。本篇后 3 章讲解了工程地震、地震作用及结构随机地震反应的基本内容，这些内容为后续章节奠定了基础。第 2 篇介绍了结构被动减振控制，主要包括基底隔震、调谐质量阻尼器、调液质量阻尼、耗能阻尼器及其它减振装置等内容。第 3 篇介绍了半主动控制和混合控制法，主要介绍了半主动变刚度、变阻尼控制、混合质量阻尼器 HMD 控制和基底隔震——主动控制系统等。第 4 篇除简要介绍了主动控制的原理、方法和工程应用外，还着重阐述了结构控制中的一个新的研究方向——结构智能控制。

读者对象：高校相关专业高年级本科生和研究生，土木建筑、水利工程、海洋与船舶工程、工程力学和相关方面科技人员

（摘自《新华书目报·科技新书目》）