

[制造·使用·改进]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2016.06.019

带锯床锯架系统力学建模与设计

江平¹, 丁泽林¹, 丁侠胜¹, 项涌涌², 赵赟劼², 梁利华²

(1. 浙江晨龙锯床股份有限公司, 浙江 缙云 321404; 2. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要:针对国产带锯床设计中,普遍存在的锯架设计不合理导致锯条寿命短、锯切精度及效率不达标、制造成本高等问题,建立了带锯床锯架力学模型;以某型号锯床为实例,根据锯架力学模型对锯条进行了应力循环分析,建立了锯条的疲劳分析模型;并以疲劳分析结果作为锯架改进设计的基础,得出了改进后详细的锯架设计参数。结果表明:改进后,带锯条受力满足疲劳强度要求,很大程度上提高了锯条寿命及锯切精度。文中所建立的锯架力学模型适用广泛,具有较高的实际应用价值。

关键词:带锯床;锯架系统;力学模型;疲劳分析;锯架设计

中图分类号: TG56 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2016)06-0085-05

Mechanics Modeling and Design of Saw Frame in Band Sawing Machine

JIANG Ping¹, DING Zelin¹, DING Xiasheng¹,
XIANG Yongyong², ZHAO Yunjie², LIANG Lihua²

(1. Zhejiang Chenlong Sawing Machine Co., Ltd., Jinyun, Zhejiang 321404, China;

2. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at the problem of the unreasonable design of saw frame causing the low service life, the substandard cutting precision and efficiency, high manufacturing cost, the mechanical model of saw frame was proposed. According to the mechanical model, the analysis of stress cycle was carried out, and the analysis model of blade fatigue was created about a type of band sawing machine. The improved design of saw frame was based on the fatigue analysis results, and the detailed design parameters about saw frame were given. The results indicated that after the improved design, the saw blade force meets the fatigue strength requirements, the service life of saw blade and the cutting precision increased. The mechanical model obtains higher value of application, and it can be applied to all kinds of band sawing machine.

Key words: band sawing machine; saw frame system; mechanics modeling; fatigue analysis; saw frame design

随着现代制造工业朝着高效、高精度和经济性的方向发展,金属切削带锯床作为金切加工重要设备已广泛地应用于钢铁、机械、汽车、造船、石油、矿山和航空航天等国民经济各个领域^[1]。金属切削带锯床主要由传动模块、锯切模块、进给模块等组成,锯架作为锯切模块的核心部分,对锯床的锯切精度及效率、带锯条的寿命和制造成本有着至关重要的影响。

近年来,学者们对带锯床锯架进行了相关的研究。么永强^[2]从适应控制和满足加工要求出发,对锯床进行了机械选型布置和结构设计;张超群^[3]等为保证进给力恒定在合理范围及获得较高生产率,通过对切削

力的研究,对转角度卧式带锯床进行了结构设计。但上述文献未对锯架系统进行深入研究,对锯架系统只通过经验值设计,未进行锯切工况下的力学分析。

本文针对国产带锯床的设计中,普遍存在着锯架设计不合理导致锯条寿命短、锯切精度及效率不达标、制造成本高等问题,对带锯床锯架建立了力学模型;以某锯床为例,根据锯架力学模型对锯条进行应力循环分析,建立锯条的疲劳分析模型;以疲劳分析结果作为锯架进行改进设计的基础,使得锯架系统结构紧凑,带锯条受力满足疲劳强度要求。

收稿日期:2016-06-14;修回日期:2016-07-19

作者简介:江平(1971),男,湖南长沙人,主要研究方向为金属切削带锯床研究设计。通信作者:项涌涌(1991),男,浙江浦江人,硕士研究生,主要研究方向为智能制造装备技术。E-mail:xiangyong@126.com

1 带锯床锯架结构

图1是常用的锯架结构简图, O_1, O_2 分别是动锯轮和主动锯轮中心, a, k 为锯带导向臂的两导向支点, ak 为带锯条锯切段, ac 和 fk 为带锯条扭转段, ed 为带锯条松弛段, 工件宽度为 D 。

根据几何关系可知:

$$L_0 = l_1 + S + l_2 \quad (1)$$

式中: S 为导向臂的间距; l_1 为从动轮侧锯条扭转段长度; l_2 为主动轮侧锯条扭转段长度。

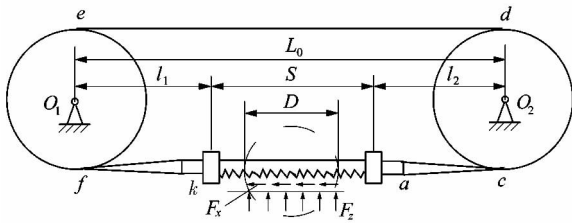


图1 锯架结构简图

Figure 1 Structure diagram of frame

2 锯架系统的力学模型

带锯条的锯切进给方向垂直于工件, 由于沿带锯条法线方向的力很小, 可把整个锯切过程近似为二维切削^[4-5], 在锯切过程中锯条主要受到与锯切方向和进给方向相反的锯切抗力 F_x 和进给抗力 F_z , 又因锯条受到从动轮的作用力很小可忽略不计, 根据平衡条件本文将锯条 fk, ed, ef 各段的受拉力近似为相同, 如图2所示。

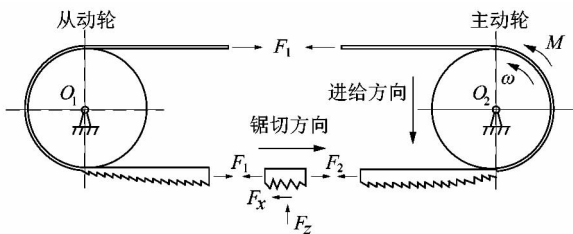


图2 工作状态下受力分析简图

Figure 2 Diagram of force analysis under working condition

$$\sigma_{t, \max}(x) = \frac{F_N(x)}{A} + \frac{M(x)}{W} = \frac{F_N(x)}{bh_1} + \frac{6M(x)}{bh_1^2} =$$

$$\begin{cases} \frac{F_1}{bh_1} + \frac{3q_z D x}{bh_1^2} & 0 \leq x < \frac{S-D}{2} \\ \frac{F_1}{bh_1} + \frac{q_x}{bh_1} \left(x - \frac{S-D}{2} \right) + \frac{3q_z}{bh_1^2} \left\{ \frac{D(2S-D)}{4} - \left(x - \frac{S}{2} \right)^2 \right\} & \frac{S-D}{2} \leq x < \frac{S+D}{2} \\ \frac{F_2}{bh_1} + \frac{3q_z D(S-x)}{bh_1^2} & \frac{S+D}{2} \leq x \leq S \end{cases} \quad (7)$$

工作状态下, 带锯条松边段和紧边段截面受到的拉力 F_1 和 F_2 分别为^[6-7]:

$$F_1 = F_x \frac{1}{(e^{f'\pi} - 1)}, \quad (2)$$

$$F_2 = F_x \frac{e^{f'\pi}}{(e^{f'\pi} - 1)}. \quad (3)$$

式中: f' 为正常工作状态时的瞬时静摩擦因数, $f' = \Phi^{-1}(F_x)$, 其中

$$F_x = \Phi(f') = \frac{F_p(L_0 + \pi R)(e^{f'\pi} - 1)}{L_0(1.5 + 0.5e^{f'\pi}) + R\left(\pi + \frac{e^{f'\pi} - 1}{f'}\right)}. \quad (4)$$

式中: F_p 为锯条受到的预张紧力; R 为主、从动锯轮的半径。

2.1 切削段 (ka 段) 力学模型

工作状态下, 由锯切段 ka 受力分析可知, 带锯条受拉弯组合变形, 其力学模型可以简化为如图3所示。由于预紧作用, 带锯条刚性好, 故锯切段的锯切抗力和进给抗力可以认为是均布的, 分别用均布力 q_x 和均布力 q_z 表示:

$$q_x = \frac{F_x}{D}; \quad (5)$$

$$q_z = \frac{F_z}{D}. \quad (6)$$

式中, D 为锯切工件宽度。

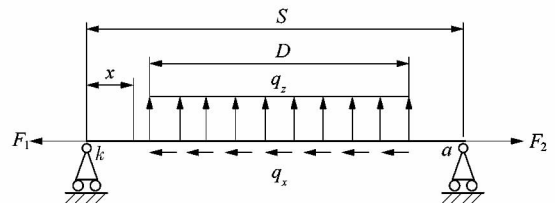


图3 锯切段受力分析

Figure 3 Force analysis of cutting section

带锯条各个截面点分布如图4所示, 锯切段带锯条截面背边 (AHG 边) 的工作应力为最大正应力, 其值为:

式中: $F_N(x)$ 为锯切段轴力; $M(x)$ 为锯切段弯矩; W 为带锯条净截面的抗扭截面模量, $W = \frac{bh_1^2}{6}$; A 为带锯条净截面积, $A = bh_1$, $h_1 = h - h_0$, h 为带锯条的宽度, h_0 为带

锯条的齿深; b 为锯条厚度。

锯切段带锯条截面齿边(CDE 边)的工作应力为:

$$\sigma_{CDE}(x) = \frac{F_N(x)}{A} - \frac{M(x)}{W} = \frac{F_N(x)}{bh_1} - \frac{6M(x)}{bh_1^2} = \begin{cases} \frac{F_1}{bh_1} - \frac{3q_z Dx}{bh_1^2} & 0 \leq x < \frac{S-D}{2} \\ \frac{F_1}{bh_1} + \frac{q_x}{bh} \left(x - \frac{S-D}{2}\right) - \frac{3q_z}{bh_1^2} \left\{ \frac{D(2S-D)}{4} - \left(x - \frac{S-D}{2}\right)^2 \right\} & \frac{S-D}{2} \leq x < \frac{S+D}{2} \\ \frac{F_2}{bh_1} - \frac{3q_z D(S-x)}{bh_1^2} & \frac{S+D}{2} \leq x \leq S \end{cases} \quad (8)$$

锯切段带锯条截面中部(B, F 点)的工作应力为:

$$\sigma_{BF}(x) = \frac{F_N(x)}{A} = \frac{F_N(x)}{bh_1} = \begin{cases} \frac{F_1}{bh_1} & 0 \leq x < \frac{S-D}{2} \\ \frac{F_1}{bh_1} + \frac{q_x}{bh_1} \left(x - \frac{S-D}{2}\right) & \frac{S-D}{2} \leq x < \frac{S+D}{2} \\ \frac{F_2}{bh_1} & \frac{S+D}{2} \leq x \leq S \end{cases} \quad (9)$$

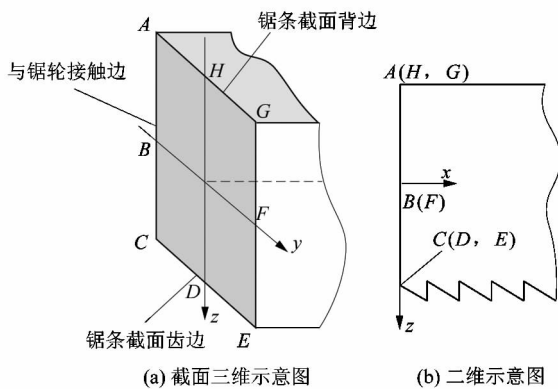


图4 带锯条截面点分布

Figure 4 Section point distribution of band saw blade

2.2 锯架系统整体力学模型

带锯条切削段 ka 段的力学模型如式(7)~(9)所示。锯切过程中带锯条各段的受力各不相同,对带锯条各段进行受力分析,如表1所示为带锯条剩余各段的力学模型。表中, E 为带锯条基体材料的弹性模量; φ 为带锯条的扭转角度; G 为带锯条基体材料的剪切弹性模量。

3 疲劳分析模型

锯切过程中,带锯条长期处于交变载荷作用下,带锯条由于应力的不断变化引起基体材料的疲劳破坏,即使最大的工作应力远低于材料的屈服极限,仍然会出现构件的骤然断裂失效^[8]。本文根据锯架力学模

表1 带锯条剩余各段力学模型

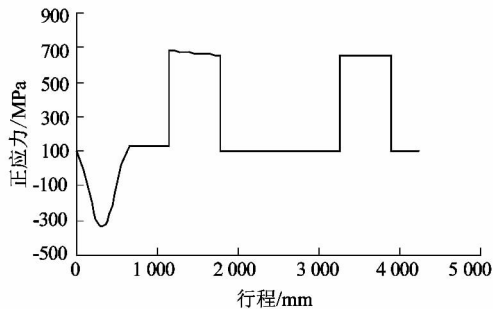
Table 1 Each section of mechanical model of band saw blade

截面段	正应力 σ 表达式			切应力 τ 表达式		
	A, B, C 点	D, H 点	E, F, G 点	A, C, E, G 点	B, F 点	D, H 点
ac	$\frac{F_2}{A}$	$\frac{F_2}{A}$	$\frac{F_2}{A}$	0	$G \frac{b\Phi}{2l_2}$	$G \frac{b\Phi}{2l_2}$
cd	$\frac{F_x e^{f\varphi}}{(e^{f\pi} - 1)A} - E \frac{b}{2R}$	$\frac{F_1}{A}$	$\frac{F_x e^{f\varphi}}{(e^{f\pi} - 1)A} + E \frac{b}{2R}$	0	0	0
de	$\frac{F_1}{A}$	$\frac{F_1}{A}$	$\frac{F_1}{A}$	0	0	0
ef	$\frac{F_1}{A} - E \frac{b}{2R}$	$\frac{F_1}{A}$	$\frac{F_1}{A} + E \frac{b}{2R}$	0	0	0
fk	$\frac{F_1}{A}$	$\frac{F_1}{A}$	$\frac{F_1}{A}$	0	$G \frac{b\Phi}{2l_1}$	$G \frac{b\Phi}{2l_1}$

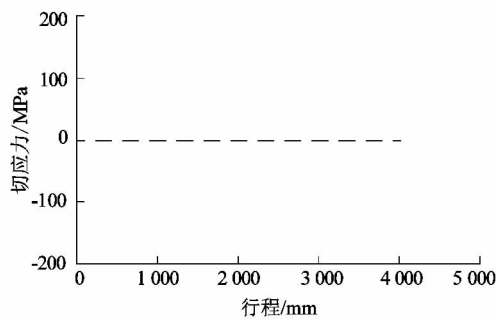
型,以某型号带锯床为例,对带锯条进行应力循环分析,并建立疲劳分析模型。

3.1 应力循环分析

锯切过程中,由于某型号卧式带锯床锯条的平均寿命较短,所以本文基于该型号卧式带锯床对带锯条进行应力循环分析。锯床的基本参数:导向臂 S 为 490 mm,锯轮半径 R 为 220 mm,锯条扭转段长度 l_1 和 l_2 都为 320 mm,扭力扳手扭矩 T 为 40 N·m,螺杆螺纹 M20,以临界锯切状态(锯切宽度 D_{max} 为 360 mm、锯切速度为 70 m/min、进给速度为 30 mm/min)为分析条件,根据表 1 中的锯架力学模型可知带锯条截面 E 点和 F 点最为危险。图 5~6 所示为 E 点和 F 点对应的应力循环图。



(a) E点正应力



(b) E点切应力

图 5 E点应力循环

Figure 5 Stress cycle of E point

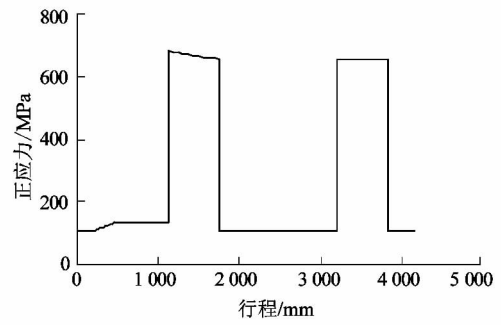
根据交变应力概念, σ_m 和 σ_a 分别为正应力的平均应力和应力幅^[9-10]:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}, \quad (10)$$

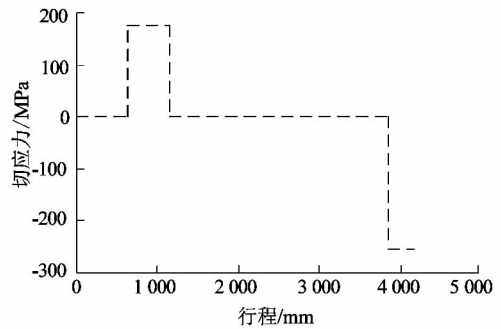
$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}. \quad (11)$$

式中: σ_{max} 和 σ_{min} 分别为应力循环中的最大应力和最小应力。

以上概念都采用正应力 σ 表示,当构件承受交变切应力时,只需将正应力 σ 改为切应力 τ 即可。



(a) F点正应力



(b) F点切应力

图 6 F点应力循环

Figure 6 Stress cycle of F point

3.2 疲劳分析模型

带锯条截面 E 点和 F 点为最危险截面点,最易发生疲劳失效,本文对截面点 E 和点 F 建立疲劳分析模型。

3.2.1 带锯条截面点 E 的疲劳分析

由图 5 可知,带锯条截面点 E 在一个应力循环中没有切应力,承受拉、弯组合变形,故疲劳强度需满足下式:

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{k_\sigma}{\varepsilon_\sigma \beta} \sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m} \geq n_1. \quad (12)$$

式中, k_σ 为对称循环下的有效应力集中系数, $k_\sigma = \frac{\sigma_d}{\sigma_k}$, σ_d 为表面磨光的锯条试样持久极限, σ_k 为有应力集中系数; β 为锯条试样表面质量系数, $\beta = \frac{\sigma_\beta}{\sigma_d}$, σ_β 为其他情况时锯条试样持久极限; ε_σ 为对称循环下的尺寸系数, $\varepsilon_\sigma = \frac{\sigma_d}{\sigma_{-1}}$, σ_{-1} 为光滑小试样的试样持久极限; n_σ 拉弯载荷作用下的计算疲劳安全系数; n_1 为疲劳强度条件,取值范围 1.10 ~ 1.20; ψ_σ 为对于应力循环非对称性的敏感系数,与材料有关,其值通过手册可知。

3.2.2 带锯条截面点 F 的疲劳分析

由图 6 可知,带锯条截面点 F 在一个应力循环中承受拉、弯、扭组合变形,故疲劳强度需满足下式:

$$n_{\sigma\tau} = \frac{n_{\sigma} \cdot n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}} \geq n_2 \quad (13)$$

式中: $n_{\sigma\tau}$ 为拉、弯、扭组合的计算疲劳安全系数; n_2 为疲劳强度条件,取值范围为 1.05 ~ 1.20; n_{τ} 为纯扭转计算安全系数,其值为

$$n_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{k_{\tau} \beta \tau_a + \psi_{\tau} \tau_m} \quad (14)$$

式中: n_{τ} 为拉弯载荷作用下的计算疲劳安全系数; k_{τ}

为对称循环下的有效应力集中系数, $k_{\tau} = \frac{\tau_d}{\tau_k}$, τ_d 为表面

磨光的锯条试样持久极限, τ_k 为有应力集中系数; β 为

表面质量系数, $\beta = \frac{\tau_{\beta}}{\tau_d}$, τ_{β} 为其他情况时锯条试样持久

极限, ε_{τ} 为对称循环下的尺寸系数, $\varepsilon_{\tau} = \frac{\tau_d}{\tau_{-1}}$, τ_{-1} 为光滑

锯条小试样的试样持久极限; n_{τ} 拉弯载荷作用下的计算疲劳安全系数; ψ_{τ} 为材料对于应力循环非对称性的敏感系数,其值通过手册可知; τ_a 和 τ_m 分别为切应力的平均应力和应力幅。

由试验可知,钢材的疲劳极限与强度极限之间存在近似关系:①弯曲: $\sigma_{-1} \approx 0.4\sigma_b$;②拉压: $\sigma_{-1} \approx 0.28\sigma_b$;③扭转: $\sigma_{-1} \approx 0.23\sigma_b$ 。综合文献[11]及相关手册, E 点的疲劳安全系数为:

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{1.2\sigma_a + 0.3\sigma_m} \geq 1.10 \sim 1.20 \quad (15)$$

F 点的疲劳安全系数为:

$$n_{\sigma\tau} = \frac{n_{\sigma} \cdot n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}} \geq 1.05 \sim 1.20 \quad (16)$$

式中: $n_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{1.2\tau_a + 0.25\tau_m}$; $n_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{1.2\sigma_a + 0.3\sigma_m}$ 。

3.2.3 疲劳分析结果

根据式(10)~(14)及图 5~6 计算得:带锯条截面点 E 的疲劳强度 $n_{\sigma} = 0.79$;带锯条截面点 F 的疲劳强度 $n_{\sigma} = 1.12$, $n_{\tau} = 1.11$, $n_{\sigma\tau} = 0.78$ 。此时,截面点 E 的疲劳强度未通过;带锯条截面点 F 的疲劳强度也未通过。

4 锯架设计案例

由于某型号卧式带锯床锯架设计时,未考虑锯架设计参数对带锯条极限应力值的影响,带锯条截面点

E, F 的疲劳强度未通过,导致锯条寿命较低。该型号锯床实际设计需求为:临界锯切力 F_{xc} 为 2 600 N,锯切宽度 D_{max} 为 360 mm,当量齿线进给抗力 f_x 为 47.7 N/mm,临界松边张紧力 F_{1c} 为 4 359.5 N,临界紧边张紧力 F_{2c} 为 6 983.8 N,扭转角度 Φ 为 55°。带锯床使用 3/4 变齿的双金属锯条,其规格为 34.0 mm × 1.1 mm,带锯条基体材料为一般弹簧钢,其抗拉强度 $\sigma_b = 1 400$ MPa,考虑材料疲劳特性,其许用应力为 588 MPa。

综合锯架力学模型、应力分析结果及疲劳分析模型,通过改进锯架设计参数,使锯条满足强度要求。改进后具体的锯架设计参数如表 2 所示。

表 2 锯架设计参数

导向臂 S	锯轮半径 R	锯条扭转段长度 l_1	锯条扭转段长度 l_2
540	240	350	350

5 结论

本文建立的带锯床锯架力学模型,以锯切过程中带锯条各段的受力情况(锯切段、扭转段、松弛段)为基础,模型精确,适用性广。应用锯架力学模型,综合应力分析及疲劳分析对某型号锯床进行改进,结果表明:导向臂间距由 490 mm 增大为 540 mm,带锯轮的半径由 220 mm 增大为 240 mm,锯条的扭转段长度从 320 mm 增大为 350 mm,改进后带锯条受力情况满足疲劳强度要求。本文为锯架的设计提供了参考,具有较高的实际应用价值。

参考文献:

- [1] 郭北涛. 国内外金切锯床的现状与发展趋势[J]. 制造技术与机床, 2004(2): 32-33.
- [2] 么永强. 立式金属带锯床的机械设计与控制系统的研究[D]. 石家庄: 河北农业大学, 2004: 5-8.
- [3] 张超群, 李凤亮. 转角度卧式金属带锯床的设计与研究[J]. 无线互联科技, 2013(5): 122.
- [4] 师汉民. 金属切削理论及其应用新探[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005.
- [5] 武文革, 辛志杰. 金属切削原理及刀具[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [6] 李新和, 唐植瑶, 陈铁坚. 双金属带锯条锯削力的计算[J]. 制造技术与机床, 1997(3): 29-31.
- [7] 梁利华, 韩斌, 陈栋栋, 等. 带锯床锯切过程的力学建模[J]. 浙江工业大学学报, 2013, 41(4): 375-379.
- [8] 柴国钟, 梁利华, 王效贵, 等. 材料力学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [9] 李新和. 双金属带锯条疲劳强度分析与计算[J]. 制造技术与机床, 1995(10): 30-33.
- [10] 刘辉, 王晓云, 肖晓峰. 高速锯切加工切削过程分析[J]. 机械设计与制造, 2001(4): 79.
- [11] 刘鸿文. 材料力学教程[M]. 北京, 机械工业出版社, 1992.