

一种单电机驱动多指多关节机械手的设计

罗志增, 顾培民

(杭州电子科技大学智能控制与机器人研究所, 浙江 杭州 310018)

摘要: 为了使机械手灵巧、稳妥地抓取物体, 设计了一种新型结构的单电机驱动 4 指 12 关节机械手爪. 该手爪由电机驱动一根十字连杆, 其端部分别连接 4 个手指的第 1 动力连杆; 每个手指有 3 个指节, 由 2 个平行四边形的指节结构确保手指末端做平移运动; 每个手指的第 2 动力连杆具有延伸滑槽, 当第 2 动力连杆运动时, 经过特别设计的滑槽在固定支点滑动, 可使手指末端匀速运动. 该新型的单电机驱动手爪设计方案实现了机械手控制简单、抓握可靠的目的.

关键词: 机器人手爪; 多指多关节; 单电机驱动

中图分类号: TP24

文献标识码: B

Design of a Multi-Fingered and Multi-Joint Gripper Based on Single Motor Driving

LUO Zhizeng, GU Peimin

(Intelligent Control & Robotics Institute, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to grasp objects dexterously and stably by robot, this paper proposes a new structure for four-fingered and twelve-joint gripper based on single motor driving. The motor drives a cross-linkage, whose terminal connects the first power rod of each finger. Every finger has three joints, and two knuckles each with a parallelogram structure ensure the translational motion of fingertip. The second power rod of each finger has a prolonged chute, and the specially designed chute shifts around a fixed fulcrum to realize the fingertip uniform motion while the second power rod moves. The new design scheme of the single motor driven gripper is of simple control and solid grasp.

Keywords: robotic gripper; multi-fingered and multi-joint; single motor driving

1 引言 (Introduction)

机器人手爪作为机器人与环境相互作用的最后环节和执行部件, 对提高机器人完成任务的能力和改进行业水平有着非常重要的作用. 抓取和操作的灵活性、精确性和适应性是衡量手爪设计水平的一个重要标志. 通用工业机器人的末端执行机构多为形状简单的夹钳式、托持式、吸附式等型式, 其结构和抓握目标物的工作原理决定了其抓握功能有限. 随着机器人应用范围的扩大, 各种特种用途的机械手爪应运而生, 其中手部具有拟人化结构的多指多关节手爪尤其引人注目. 相对夹钳式结构, 多指多关节机械手更能适应不同形状物体的抓取, 其抓握也更加稳定可靠.

Utah/MIT 手是一种 4 指结构的机械手, 它具有 16 个自由度, 驱动系统是由 32 个独立的聚合绳索和气压驱动器组成的腱、滑轮传动系统^[1]. Loucks

等人研制的 Stanford/JPL 手具有 3 个手指, 每个手指具有 3 个自由度和 4 根控制线, 整个手由 12 个直流伺服电机组成的驱动块驱动^[2]. Belgrade/USC 手是一种单电机驱动的多指多关节手爪, 手指上的力由安装在蜗轮曲柄上的连杆进行传递, 连接杆一端的连接器与牵动手指的“辕马”系统相连接^[3]. 近年来, 国内北京航空航天大学 (BH-3)^[4]、哈尔滨工业大学 (HIT/DLR)^[5]、华南理工大学的 5 指形仿人机械手^[6]也取得了进展, 大连理工大学王德伦研究了一种变胞多指灵巧手^[7], 手掌的变胞增强了手指的灵巧性. 这些多指多关节机械手往往每个手指的各个关节都有独立的驱动单元, 虽然操作灵活, 但存在着结构复杂、控制繁琐、制造价格十分昂贵以及体积和重量均较大的弊端. 苏子昊等人研究了一种步进电机驱动的多连杆机构二指平动机械手爪^[8], 结构简单, 但手指的夹紧速度与电机转速并非线性

比例关系。所以，机械手爪一般需要根据特殊的应用场合进行特别设计。本文针对外形为中心对称、材质易碎的待抓取物体，设计了一种单动力源驱动的 4 指 12 关节手爪，其特点是能平行张开合拢，且在电机匀速转动时能保持手指末端匀速移动，以避免手指移动速度不均对易碎物体的冲击。

2 手爪结构设计 (Design of gripper structure)

机械手爪的结构通常根据实际应用情况来设计，当被抓对象确定时，手爪的夹持方式也基本确定了。手爪自由度多，手指灵活，其夹持对象的通用性也更强，但控制复杂、成本高。

本文设计的手爪，被抓持对象是一个方形物体，或柱状物体，且机器人抓取及操作过程要求稳定可靠。为此，作者设计了一种单电机驱动、具有 4 个手指并能中心定位的夹持爪。机械手爪在应用时手爪指尖需要安装触觉复合传感器，并要求手指在夹持物体时能保证平移夹紧，以便实施对被抓对象的触摸传感。为此，在设计中，首先根据被抓物体大小确定抓持范围，进行机构和结构设计；其次，根据确定的传动机构进行运动学分析；最后，制作模型进行功能实验，完成设计、制作及加工装配。由于 4 指同步夹紧对方形或柱状物体具有良好的夹持效果和稳定性，所以，设计的方案为单电机驱动的 4 指十字对称布置结构，每指有 3 个关节，整个手爪共 12 个指节。末端指尖是与被抓物体相接触的杆件，要求在机械手爪夹紧和张开时能保持平动，一方面是为了适应被抓物体的形状，另一方面也为了使安装在指尖的触觉传感器能更好地接触被抓对象。每个手指各关节之间力的传递采用杠杆式，其中第 1 指节动力杆是双侧传递，第 2 指节动力杆是单侧传递。指节动力杆件结合一个平行四边形连杆机构，来实现平移运动的要求，第 3 指节就是指尖，通过平动实现对物体的夹持。

单电机驱动 4 指 12 关节平移型手爪的结构示意图如图 1 所示。该手爪由步进电机、谐波减速器、十字支架连杆、牵引杆、第 1 动力杆、第 2 动力杆及延伸滑槽和指尖等组成，其中第 1、第 2 指节具有一个平行四边形的“背包”连杆结构以保证指尖在手爪张开合拢时能够平移运动。采用谐波减速器的目的是以尺寸紧凑的结构得到较大的减速比，减速器由波发生器、柔轮和刚轮组成，在结构上与电机、手爪本体是一体化的。手爪的工作过程如下：步进电机驱动谐波减速器，输出轴端与丝杠相连接，丝杠

上的螺母则与十字支架连杆相连接。当控制步进电机进行正、反转时，可使丝杠带动的十字支架连杆沿丝杠轴线上、下移动，在十字支架连杆的 4 个端部连接 4 个可调整轴向位置的伸缩杆。伸缩杆与牵引杆连接，跟随十字支架连杆上、下运动，并带动 4 个手指的第 1 动力杆进行开合运动。第 1 动力杆的运动起始点可由伸缩杆上的调整螺母进行调节，并可保证 4 个手指对中心轴是对称的。第 1 动力杆将动力传递给第 2 动力杆。第 2 动力杆的杠杆原理是，驱动力和反作用力作用于支点的同一侧，由于支点位于杆件的延伸滑槽中，受力点与支点间的力臂是变化的。滑槽被设计成封闭的曲线槽（封闭凸轮），适当的曲线参数能在电机匀速转动时使指尖的张开合拢也是匀速的。手爪做开合运动时，滑槽（第 2 动力杆）沿支点滑动和转动。支点通过 4 个斜撑被固定于手爪体上，斜撑的轴销外镶一个轴承形成支点，由轴承外缘与滑槽发生相对滑动或转动。由于曲线槽的参数决定了第 2 动力杆作用力臂的变化，所以曲线槽的设计特别重要。当第 1 动力杆带动第 2 动力杆的延伸滑槽沿斜撑轴销支点移动并转动时，第 2 动力杆端部的指尖夹向或离开目标物体。第 1、第 2 动力杆的平行四边形“背包”连杆保证指尖平移夹紧或松开。

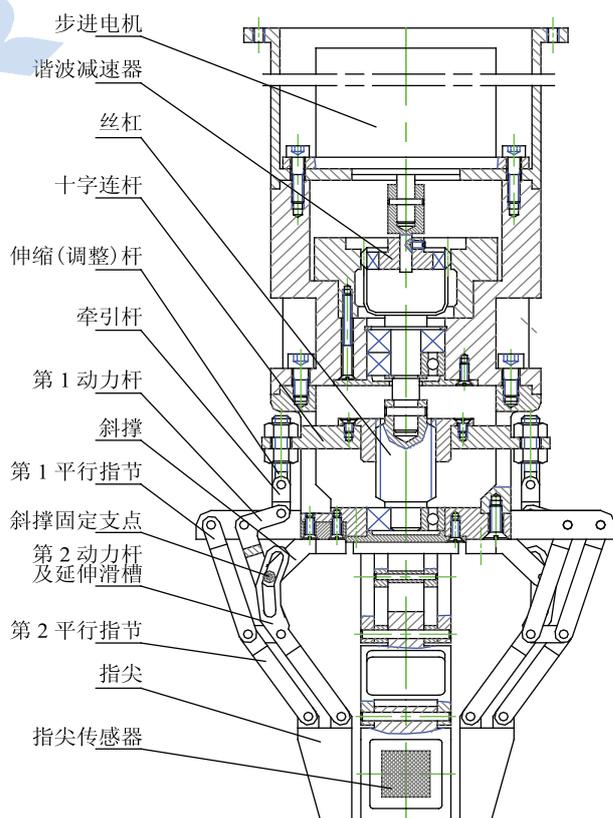


图 1 4 指 12 关节手爪结构示意图

Fig.1 Structure of four-fingered and twelve-joint gripper

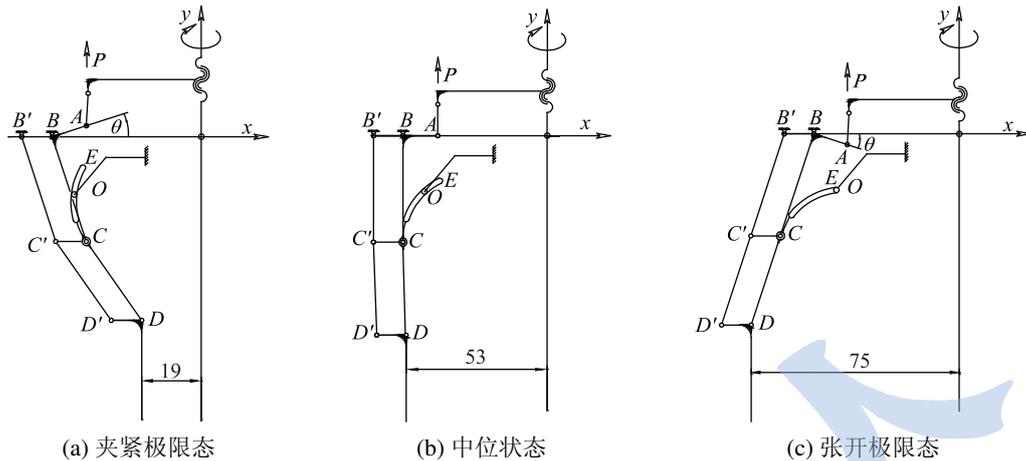


图2 机械手运动的3个状态

Fig.2 Three states of the gripper motion

对图1结构中一个手指的运动状态进行分析,其夹紧极限状态、中位状态和张开极限状态的机构关系如图2所示.丝杆螺母运动副致使P点做上下直线运动,由于B是固定铰链,所以P点上下运动时,牵引杆会有微小的右摆,A点的垂直向移动距离与P点上下运动距离并非完全相等.连杆机构中,A点到C点的运动关系仅仅是简单的线性比例关系, $B'C'$ 连杆的作用是使 $C'C$ 杆做平行于 $B'B$ 的水平平动.显然,由于直线运动—圆弧运动—直线运动间的两次过渡传递,P点上下运动与C点水平运动的关系不再是简单的线性比例关系,所以,P点做匀速运动时,C点的水平运动是变速的.为使手指水平移动的速度与P点上下运动速度保持线性比例关系,以便于机械手爪的控制,在手爪的机构设计中增加了ECD杆件(第2动力杆).该杆件分为EC弧形段和CD直线段,运动传递过程尽管仍然是简单的杠杆关系,但由于回转支点O在ECD杆件的位置并不固定,导致传动臂CO和DO都是变化的.弧形CE杆沿O点滑动,由于CE杆的弧形曲线可以任意设计,所以总可以找到一种曲线,使传动臂CO和DO之比的变化能补偿P点上下运动至C点水平运动的非线性传递关系,进而使D点的水平运动速度与P点的上下运动速度成线性比例关系.

3 运动学分析 (Kinematics analysis)

将图1的手爪结构图画成杆件连接关系图,如图3所示,其中图3(a)是手爪中位,图3(b)是夹紧位置.为了分析从电机到指尖的运动传递关系,设电机转速为 n r/min,减速器速比为 i ,丝杆螺距为 δ mm,则十字支架连杆的移动速度为

$$v_1 = \frac{n}{60 \times i} \cdot \delta \quad (1)$$

式中, v_1 单位是mm/s.

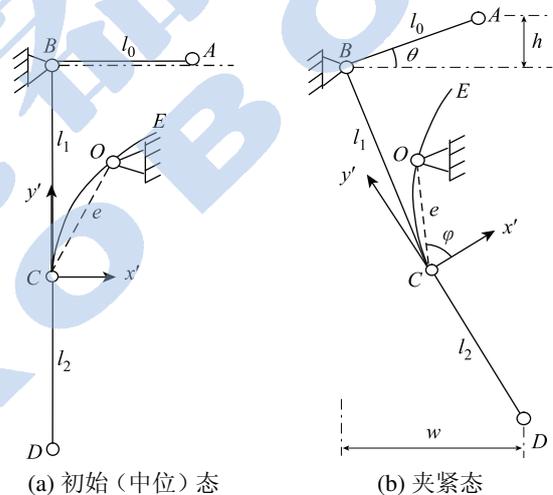


图3 杆件的连接关系简图

Fig.3 The connection relationship of gripper rods

十字支架连杆带动牵引杆运动,使第1动力杆的A点绕固定支点B转动,A点运动的垂直向距离与十字支架连杆的移动距离相等.如果初始状态A、B在同一水平上,即第1动力杆的水平夹角 $\theta_0 = 0$,那么 t 时刻A点上升的高度 $h = v_1 t$.由于牵引杆的摆动幅度很小,忽略牵引杆摆动的影响,第1动力杆的角速度 ω_1 约为

$$\omega_1 \approx (\arcsin \frac{v_1 t}{l_0}) / t \quad (2)$$

式中, l_0 是第1动力杆上AB的长度,单位为mm, ω_1 的单位是rad/s.

t 时刻第1动力杆AB的水平夹角

$$\theta = \frac{360}{2\pi} \cdot \omega_1 t \quad (3)$$

参见图3,设第1动力杆上BC长度是 l_1 ,且BC与BA固接并垂直,第2动力杆直线段CD的长度是

l_2 , 延伸滑槽 CE , 滑槽上的支点 O 相对于 B 点的坐标是 (a, b) , $x'Cy'$ 是固定在第 2 动力杆上的坐标, 那么, 滑槽上的支点 O 离 $x'Cy'$ 坐标原点 C 的极径 e 是

$$e = \sqrt{(l_1 \cos \theta - b)^2 + (a - l_1 \sin \theta)^2} \quad (4)$$

如果被控手爪指尖的水平方向夹紧速度是 v_2 mm/s, t 时刻水平方向移动了 $w = v_2 t$, 第 1 动力杆和第 2 动力杆相对转角 θ' 为

$$\theta' = \arcsin \frac{v_2 t - l_1 \sin \theta}{l_2} \quad (5)$$

在图 3(b) 中, OC 与 Cx' 的夹角 φ (极角) 是 OC 的水平夹角与第 1 动力杆转过的角度 θ 和第 2 动力杆相对第 1 动力杆的转角 θ' 之差, 即

$$\varphi = \arctan \frac{l_1 \cos \theta - b}{a - l_1 \sin \theta} - \theta - \arcsin \frac{v_2 t - l_1 \sin \theta}{l_2} \quad (6)$$

式 (4)、(6) 构成了第 2 动力杆滑槽曲线的极坐标方程。

4 滑槽参数计算和试验 (Parameter calculation of chute and experiment)

通常, 以平行四边形机构为背包连杆的电动机械手爪^[9], 在电机匀速转动的情况下, 其指尖夹紧或张开的速度是变化的, 在平行四边形机构成直角时速度最大, 大于或小于 90° 时速度减小, 所以, 当手爪开度不相同速度就不同。这样, 在一些对手爪夹紧、张开速度有严格匀速要求的场合, 尽管可以由控制系统通过电机变速实现匀速控制, 但增加了控制难度。本文 4 指 12 关节机械手爪的结构, 其最大的优点就是, 通过第 2 动力杆延伸滑槽的曲线参数变化, 能补偿以平行四边形机构为背包连杆的机械手爪的夹持速度非线性。下面以设计实例加以说明。

以作者实际设计的手爪为例, 所有未说明的长度单位为 mm。杆件尺寸 $l_0 = 11$, $l_1 = 40$, $l_2 = 35$, 滑槽上的支点 O 相对于 B 点的坐标是, $a = 19$, $b = 21$, 手爪抓取物体的范围确定为直径 $38 \sim 150$ 的近柱状物体或方形体。由于手爪是 4 指对称结构, 所以对于单根手指来说, 离中心轴最小为 19, 最大为 75, 运动行程为 56。仍规定初始状态为手爪中位, 即 A 、 B 在同一水平上, 且确定指尖运动的 56 mm 行程中, 34 mm 在夹紧一侧, 22 mm 在张开一侧, 那么指尖运动行程 w 在 $[-22, 34]$ 内变化。考察夹紧时单边的运动状况, 设 h 在 $0 \sim 3.4$ mm 变化, w 在 $0 \sim 34$ mm 变化, θ 在 $0 \sim 18^\circ$ 之间变化, 将其等分并按式 (4)、(6) 得表 1 所示手爪运动各点与对应的滑槽曲线

极坐标参数。进一步细分参数间隔, 并延伸至张开区间, 可得细分的 e - φ 参数表。手爪张开时的参数求法与之类似。

表 1 手爪运动与滑槽间对应的坐标参数

Tab.1 Coordinate parameters of the gripper motion and chute

序号	h /mm	θ / $^\circ$	w /mm	e /mm	φ / $^\circ$
1	0.000	0.000	0.000	26.870	45.000
2	0.500	2.605	5.000	25.586	39.994
3	1.000	5.216	10.000	24.306	35.104
4	1.500	7.837	15.000	23.031	30.311
5	2.000	10.476	20.000	21.763	25.595
6	2.500	13.137	25.000	20.506	20.932
7	3.000	15.827	30.000	19.265	16.284
8	3.400	18.004	34.000	18.288	12.535

根据 e - φ 参数表, 结合滑槽槽宽, 可在加工中心完成滑槽的加工。在滑槽支点移动范围以外的地方, 可以根据结构要求进行过渡性设计, 使外形更加美观, 具有流线型。

当步进电机工作转速 $n = 1000$ r/min, 谐波齿轮减速器减速比 $i = 80:1$, 丝杠螺母副的螺距 $\delta = 1.25$ mm 时, 由式 (1) 知, A 点的上升速度 $v_1 = 0.260$ mm/s, 由表 1 知, A 点上升速度是 D 点夹紧速度的 $1/10$, 所以, 指尖的夹紧速度是 $v_2 = 2.6$ mm/s。要提升夹紧或张开的速度, 可以通过改变电机转速、速比及螺距等参数实现。

为验证设计方案的正确性, 在步进电机上设置一个码盘, 用于检测真实角位移; 在手指尖处放置位置标示器 (悬浮滑块), 其下方设置磁致伸缩位置检测装置, 得到手指的水平移动距离。通过电机角位移计算得到 A 点移动距离 h , 它与实际测得的指尖移动距离 w 的变化关系如图 4 所示。测量过程分段进行, 在设定的待测位置处实施静态读数。由图 4 可见, h 与 w 的变化与设计基本一致, 实际所测数据的非线性误差小于 $\pm 1\%$ 。

图 5 是 4 指 12 关节单电机驱动匀速平移夹持型机械手爪的照片, 该手爪就是按上述实例参数加工而成, 图中正在用触觉传感器抓取一个模拟目标工件, 实际应用表明该手爪的操控性能非常理想。

该机械手爪的主要技术参数如下: 1000 r/min 电机转速下, 夹紧速度为 2.6 mm/s; 工件最小夹紧尺寸为 38 mm, 工件最大夹紧尺寸为 150 mm; 外形尺寸最大为 196 mm \times 196 mm \times 260 mm, 最小为 115 mm \times 115 mm \times 260 mm; 质量 (含电机) 为 3.2 kg。

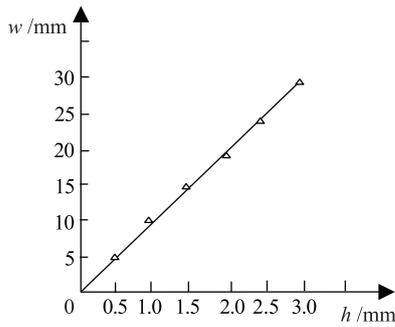
图4 h 和 w 对应关系Fig.4 Relationship between h and w 

图5 多指多关节机械手照片

Fig.5 Photograph of multi-fingered and multi-joint gripper

5 结论 (Conclusion)

本文设计了一种新的单电机驱动的4指12关节机械手结构,4指呈十字状对称分布,每个手指具有3个指节,两个传动指节都以平行四边形连杆机构作背包,保证指尖做平移运动.该机械手爪最显著的结构特点是,通过一个特殊设计的曲线滑槽及其巧妙的传递关系,在电机匀速转动时实现手指的匀速夹紧或张开.该电动机械手爪的这一特点大大降低了手爪控制的复杂性,使之更广泛地应用在各种要求手指匀速夹紧的场合.另外,在外形尺寸相同的前提下,这种结构的手爪抓取物体的适应性强,抓起物的尺寸变化范围大,抓起稳定可靠,在单电机驱动的机械手爪结构中有明显的优势.

参考文献 (References)

- [1] Kriegman D J, Siegel D M, Narasimhan S, et al. Computational architecture for the Utah/MIT hand[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1985: 918-924.
- [2] Loucks C S, Johnson V J, Boissiere P, et al. Modeling and control of the Stanford/JPL hand[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1987: 573-578.
- [3] Bekey G A, Tomovic R, Zeljkovic I. Control architecture for the Belgrade/USC hand[M]//Dextrous robot hands. New York, USA: Springer-Verlag, 1990: 136-149.
- [4] 王国庆, 李大寨, 钱锡康, 等. 新型三指灵巧机械手的研究[J]. 机械工程学报, 1997, 33(3): 71-75.
Wang Guoqing, Li Dazhai, Qian Xikang, et al. Developing of a new dextrous three-fingered hand[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1997, 33(3): 71-75.
- [5] Gao X H, Jin M H, Jiang L, et al. The HIT/DLR dextrous hand: Work in progress[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 3164-3168.
- [6] 李基亮, 肖南峰. 五指形仿人机械手的设计与实现及示教[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(1): 193-196.
Li Jiliang, Xiao Nanfeng. Implementation and teaching of humanoid hand with five fingers and palm[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(1): 193-196.
- [7] 王德伦, 崔磊, 戴建生. 变胞多指灵巧手分析[J]. 机械工程学报, 2008, 44(8): 1-6.
Wang Delun, Cui Lei, Dai Jiansheng. Analysis of the metamorphic multifingered dextrous hand[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(8): 1-6.
- [8] 苏子昊, 孔庆忠. 关节型机器人二指平动手爪的设计[J]. 机械工程与自动化, 2008(5): 80-81,84.
Su Zihao, Kong Qingzhong. Design of two-finger translation gripper of articulated robot[J]. Mechanical Engineering and Automation, 2008(5): 80-81,84.
- [9] 罗志增, 邵远, 何发昌. HI-1三感觉机械手的研究[J]. 机器人, 1992, 14(4): 43-46.
Luo Zhizeng, Shao Yuan, He Fachang. Research on three-senses manipulator for "HI-1" robot [J]. Robot, 1992, 14(4): 43-46.

作者简介:

罗志增 (1965-), 男, 教授. 研究领域: 机器人智能, 传感器技术.

顾培民 (1952-), 男, 高级实验师. 研究领域: 机械结构与设计.