

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2021.04.006

3腔道仿生软体爬行机器人设计

霍前俊, 刘 胜, 张远飞, 陈国庆, 毛 蔚

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘 要:为了改善软体机器人复杂的结构和繁琐的控制系统,课题组设计了一种气压驱动仿生软体爬行机器人,由3腔道外波纹式软体驱动器和前后卡脚组成。根据驱动器各个气腔内部气压产生不同方向的弯曲变形,实现了爬行机器人前进、转向和抬头等仿蠕虫运动;同时,基于虚功原理和Yeoh模型搭建了非线性数学预测模型。为验证预测模型的准确性,设计了有限元仿真分析和实体样机试验,将所得数据与数学模型预测值进行对比,结果表明非线性数学预测模型具有有效性。本研究提出了结构更简洁、弯曲更灵活、力学性能更好的3腔道仿生软体爬行机器人,建立的数学预测模型能够较为准确地预测3腔道软体驱动器在不同气压下弯曲步幅的大小。

关 键 词:软体机器人;外波纹;软体驱动器;虚功原理;Yeoh模型

中图分类号:TP242;TH39 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2021)04-0026-05

Research of Three-Cavity Bionic Soft Crawling Robot

HUO Qianjun, LIU Sheng, ZHANG Yuanfei, CHENG Guoqing, MAO Wei

(School of Mechanical and Automobile Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to improve the complex structure and cumbersome control systems of the soft robot, a pneumatically driven bionic soft crawling robot composed of a three-cavity external corrugated soft driver and front and rear clamp feet was designed. According to the internal air pressure of each air cavity of the driver, the bending deformation was generated in different directions, and the worm-like movement of the crawling robot such as moving forward, turning, and raising its head was realized. At the same time, a nonlinear mathematical prediction model was built based on the principle of virtual work and the Yeoh model. In order to verify the accuracy of the prediction model, a finite element simulation analysis and a physical prototype test were designed, and the obtained data was compared with the predicted value of the mathematical model. The results show that the nonlinear mathematical prediction model is effective. A three-cavity bionic soft crawling robot with simpler structure, more flexible bending, and better mechanical properties was proposed, and the established mathematical prediction model can predict the bending step size of the three-cavity soft driver more accurately under different air pressures.

Keywords: soft robot; external corrugation; soft driver; virtual work principle; Yeoh model

由柔性材料^[1]制成的软体机器人,可在较大的范围内任意改变自身形状和尺寸。与传统刚性机器人相比,柔性材料赋予了软体机器人更加优越的特性^[2],如改进机械的鲁棒性、简化了机械的结构与控制^[3],以及更加安全的人机交互功能。这些优异的特性使得软体机器人在医疗、加工制造、探测及救援等^[4-6]众多领域都有广阔的应用前景。

近年来,软体机器人技术在国内外得到了巨大的

发展,其中仿生型软体机器人因为其通用性和应用范围广的特点,得到众多学者的广泛关注。Rus研究团队设计了一款仿蛇形气动软机器人^[7-8],基于蛇形蜿蜒运动的数学关系,建立了软体机器人蛇形步态算法。Nemitz带领的团队基于声圈驱动研制了一款软体模块化机器人^[9],实现了机器人仿蠕虫运动。此外,Renda和SADATI等利用绳索驱动设计了一款软体操作臂机器人^[10-11],建立了多段式软体操作臂的力学控制模

收稿日期:2021-04-05;修回日期:2021-05-25

基金项目:国家自然科学基金青年基金(11604205)。

第一作者简介:霍前俊(1995),男,安徽六安人,硕士研究生,主要研究方向为软体机器人。E-mail:15922435649@163.com

型。然而,前人研究多自由度软体机器人多基于复杂的多模块结构和繁琐的控制系统。如何基于单个驱动器、简单的控制系统设计出更灵活的且力学性能更加有效的仿生软体机器人的方法前人涉及相对较少。

课题组设计了一款3腔道外波纹式软体驱动器,基于Yeoh模型构建气压与驱动器弯曲步幅的非线性数学预测模型。结合有限元仿真和样机试验验证预测模型的有效性。同时将3腔道软体驱动器与卡脚相结合研制了一种结构简洁、灵活性高的仿生软体爬行机器人。

1 仿生软体爬行驱动器的结构设计

软体驱动器是否具有好的弯曲性能是由驱动器的延展面和约束面共同决定的。为提高软体驱动器的弯曲性能,将驱动器的延展面设计为波纹结构,其驱动器外壁直径相等,驱动器结构如图1所示。

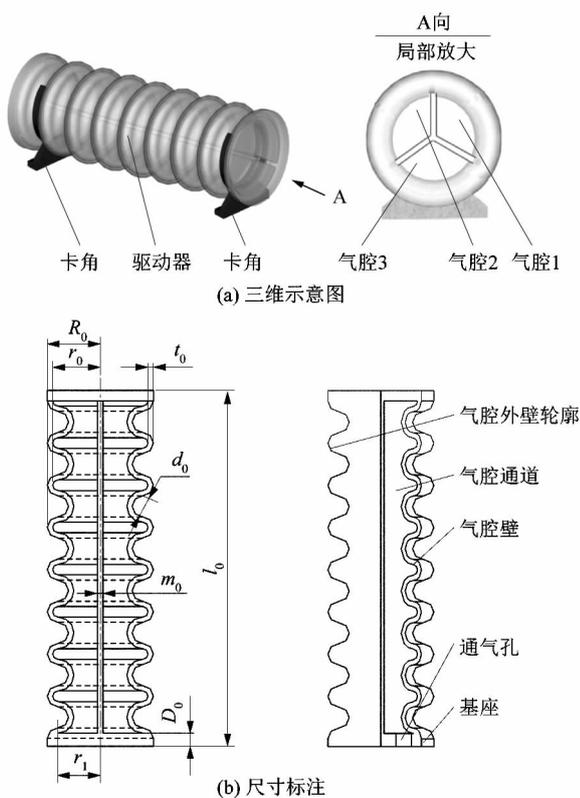


图1 软体爬行的结构示意图

Figure 1 Structural diagram of soft robot crawling

借鉴所研究的多腔式软体驱动器结构,将波纹管气腔划分为3个等体积的扇形腔室,并对3个腔室进行命名如图1(a),驱动器在3个气腔的相互作用下可实现周向360°弯曲变形。该软体驱动器结构简单、反应速度快、弯曲方向灵活,经过多次的仿真与实验,并结合驱动器的结构特性确定了软体驱动器的结构尺

寸,如表1所示。

表1 软体驱动器设计参数

Table 1 Software driver design parameters

mm			
驱动器 长度 l_0	驱动器 半径 R_0	空腔内 半径 r_0	外壁半圆 直径 d_0
100	18	16	4
基座高 D_0	气腔壁厚 t_0	气腔划分 薄壁厚 m_0	外壁轮廓半圆 圆心半径 r_1
2	2	2	14

2 超弹性材料本构模型

软体驱动器的材料均具有非线性力学特性。在力的作用下,驱动器本身可延展数倍于自身长度。当撤销外力时,又会恢复到原有的状态。国内外学者提出了许多超弹性材料的本构模型,例如Mooney-Rivlin模型、Yeoh模型和Valanis-Landel应变能函数等。为了简化数学预测模型,选择Yeoh模型作为超弹性材料的应变能密度函数。

超弹性软体硅胶材料具有各向同性且不可压缩性,故可得应变能密度函数的通用式:

$$W = W(I_1, I_2, I_3). \quad (1)$$

硅胶材料具有不可压缩性,即其式中 $I_1 = 1$, 式中 I_1, I_2 和 I_3 为变形张量不变量。其公式如下:

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2; \quad (2)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2; \quad (3)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 = 1. \quad (4)$$

式中: λ_1, λ_2 和 λ_3 分别为轴向拉伸比、径向拉伸比和周向拉伸比。

由上文可知选用Yeoh模型建立气压-弯曲数学模型,其应变能密度函数为:

$$W = \sum_{i=1}^N C_i (I_1 - 3)^i + \sum_{k=1}^N \frac{1}{d_k} (J - 1)^{2k}. \quad (5)$$

式中: N, C_i 和 d_k 分别为材料常数;对于不可压缩硅胶材料 $J=1$ 。

二参数是常用的经典形式,当 $N=2$ 时即为二参数形式:

$$W = C_1 (I_1 - 3) + C_2 (I_1 - 3)^2. \quad (6)$$

假设径向拉伸比 $\lambda_2 = 1$, 由公式(4)可得:

$$\lambda_3 = \frac{1}{\lambda_1}, I_1 = \lambda_1^2 + \frac{1}{\lambda_1^2} + 1. \quad (7)$$

经过化简可得:

$$W = C_1 \left(\lambda_1^2 + \frac{1}{\lambda_1^2} - 2 \right) + C_2 \left(\lambda_1^2 + \frac{1}{\lambda_1^2} - 2 \right)^2. \quad (8)$$

由超弹性材料 Yeoh 模型的材料参数可知式(8)

$$C_1 = 0.11 \text{ MPa}, C_2 = 0.02 \text{ MPa}, \lambda_1 = \frac{\theta}{\sin \theta}.$$

3 非线性建模

驱动器在气压的作用下弯曲,在此过程中未受其他外力作用。根据虚功原理可认为气压做的功完全消耗于驱动器的变形所需要的功,其表达式为:

$$p dV_a = V_r dW. \quad (9)$$

式中: V_a 为变形后气腔体积, V_r 为变形后硅胶材料的体积, p 为气压。

由于硅胶材料的不可压缩性, V_r 可视为未变形前的硅胶材料体积以便于计算。式(9)2 边对弯曲角度 θ 进行求导可得:

$$p \frac{dV_a}{d\theta} = V_r \frac{dW}{d\theta}. \quad (10)$$

驱动器的各个气囊几何特征完全相似,可将多个相同的气囊内几何体积视为图 2 所示图形绕 Y 轴旋转 180° 所得。同时将气囊分成 V_1 和 V_2 2 部分,其平面示意图如图 2 所示。

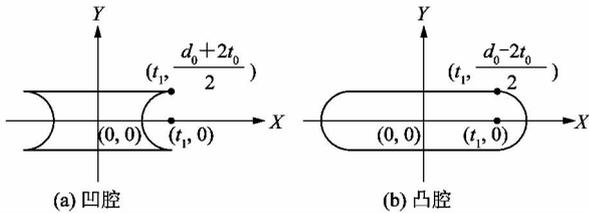


图 2 驱动器气囊平结构面示意图

Figure 2 Schematic diagram of flat structure of driver airbag

如图 2 所示,2 种气腔内壁轮廓半圆的线性公式分别为: $(x - t_1)^2 + y^2 = (\frac{d_0 + 2t_0}{2})^2$, 其中 $x \leq t_1$; $(x - t_1)^2 + y^2 = (\frac{d_0 - 2t_0}{2})^2$, 其中 $x \geq t_1$ 。由积分可得内凹式内部气腔体积 V_1 和外凸式内部气腔体积 V_2 :

$$V_1 = 2 \int_0^{\frac{d_0+2t_0}{2}} \pi \left[-\sqrt{\left(\frac{d_0 + 2t_0}{2}\right)^2 - y^2} + t_1 \right] dy; \quad (11)$$

$$V_2 = 2 \int_0^{\frac{d_0-2t_0}{2}} \pi \left[\sqrt{\left(\frac{d_0 - 2t_0}{2}\right)^2 - y^2} + t_1 \right] dy. \quad (12)$$

软体驱动器的分隔腔室的薄壁体积 V_3 的表达式为:

$$V_3 = \left[\frac{-8\left(\frac{d_0+2t_0}{2}\right)^2 \pi + 7(d_0 - 2t_0)^2 \pi}{2} + l_0 \times t_1 \right] \times m_0 \times m. \quad (13)$$

式中 m 为软体驱动器划分气腔的个数。

由式(11) ~ 式(13)可得变形后气腔体积 V_a 的近似表达式:

$$V_a = \left[\frac{8V_1 + 7V_2}{m} - V_3 \right] \times 1 \times \frac{1 + \lambda_1}{2}. \quad (14)$$

为了便于求出驱动器硅胶材料的体积,先计算出整个驱动器的体积(气腔体积加硅胶材料体积)。同理将驱动器划分成 2 个部分:8 个内凹部分和 7 外凸部分。由于驱动器外壁轮廓的半圆直径相等,即驱动器的体积 V_4 表达式为:

$$V_4 = 16 \int_0^{\frac{d_0}{2}} \pi \left(-\sqrt{d_0^2 - y^2} + t_1 \right)^2 dy + 14 \int_0^{\frac{d_0}{2}} \pi \left(\sqrt{d_0^2 - y^2} + t_1 \right)^2 dy. \quad (15)$$

由式(11) ~ (13)和式(15)可得硅胶材料体积 V_r 的表达式:

$$V_r = V_4 - V_1 - V_2 + V_3 + 2\pi D_0 R_0^2. \quad (16)$$

由公式(10)变形可得气压和弯曲角度之间的数学关系:

$$p = V_r \cdot \frac{dW}{d\theta} / \left(\frac{dV_a}{d\theta} \right). \quad (17)$$

根据式(16)、式(8)和式(14)可知公式(17)中仅含有未知量 p 和 θ 2 个未知量,即明确压强和驱动器弯曲角度之间的数学关系:

$$\theta = \theta(p). \quad (18)$$

驱动器在气压的作用下弯曲变形,其弯曲形变可近似视为等直径的圆弧,如图 3 所示。

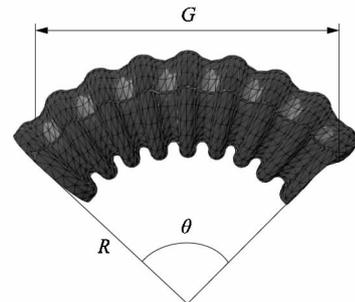


图 3 驱动器拱起时结构参数

Figure 3 Structure parameter of driver arching

已知驱动器原长为 l_0 ,如图 3 可知步幅 G 、弯曲半径 R 与弯曲角度 θ 的数学关系:

$$2\pi R \cdot \frac{\theta(p)}{360^\circ} = l_0; \quad (19)$$

$$\sin \frac{\theta(p)}{2} = \frac{G}{2R}. \quad (20)$$

由式(18)~(20)可知压强 p 和驱动器步幅 G 之间的非线性关系:

$$G = \frac{360^\circ \cdot l_0 \cdot \sin \frac{\theta(p)}{2}}{\pi \cdot \theta(p)} \quad (21)$$

4 样机实验与仿真

4.1 驱动器的弯曲实验

在三维软件中建立3腔道仿生软体爬行几何模型,导入 Abaqus 中,并设置材料参数 $C_1 = 0.11 \text{ MPa}$, $C_2 = 0.02 \text{ MPa}$ 。为了使软体爬行机器人获得最大的步幅 G ,各个气腔在气压的作用下相互协调控制驱动器的弯曲程度和变形方向。分别对驱动器的几何模型和实物样机进行单腔道、双腔道弯曲试验。如图4所示,从上到下对应的气压分别为 $0.005, 0.010, 0.015, 0.020, 0.025$ 和 0.030 MPa 。图中深色为模型,白色为实物样机。

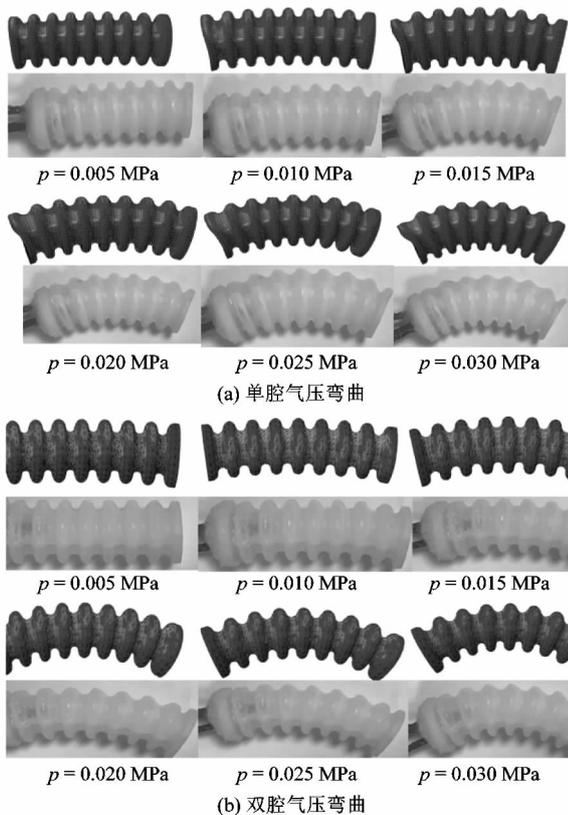


图4 仿真与实验对比图

Figure 4 Comparison of simulation and experiment

为验证仿真与预测模型的准确性,根据仿真、实验和预测结果绘制了单腔道气压、双腔道气压下驱动器充入气压与步幅值曲线,如图5所示。

如图5所示,随着气压的增大驱动器步幅逐渐减小、弯曲程度加大。与单腔气压相比,通入相同气压条

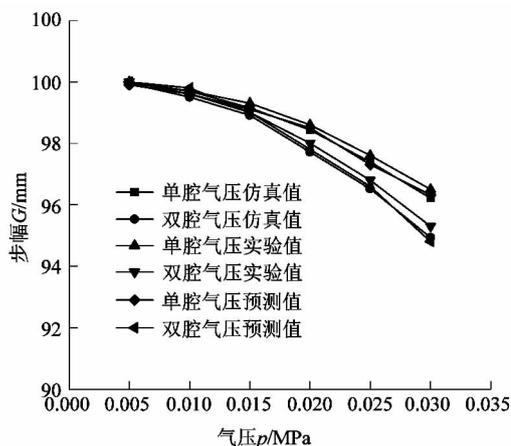


图5 不同气压、气腔下驱动器步幅值

Figure 5 Step value of driver under different air pressure and air cavity

件下双腔气压使驱动器弯曲程度更大。因而选择双腔同时通入气压,为爬行机器人提供动力。同时驱动器的实际测量值和理论模型值、有限元分析值有一定的误差,但整体的趋势基本相同。

4.2 驱动器的爬行实验

为验证3腔道仿生软体爬行机器人的运动能力,对爬行机器人的运动姿态进行仿真与实验,得出了爬行机器人可以模仿自然界环节蠕虫的3个基本动作:转向、前进和抬头。爬行机器人运动姿态如图6所示。

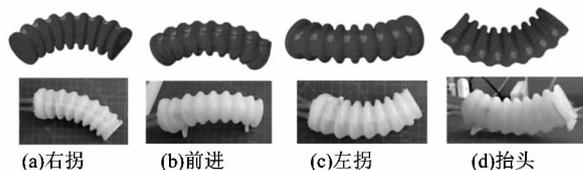


图6 爬行机器人运动姿态

Figure 6 Movement posture of crawling robot

由图6可知,爬行机器人基本具备环节蠕虫的运动特性。为验证爬行机器人的爬行能力,进行了如图7所示的前进运动试验。

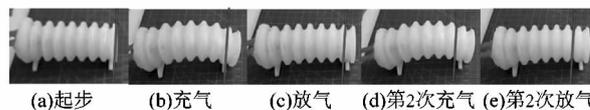


图7 爬行机器人前进运动图

Figure 7 Forward motion diagram of crawling robot

如图7所示,横线为爬行机器人起始位置,对驱动器气腔1和气腔2进行2次冲放气,爬行机器人向前

前进了 2 mm。

5 结论

课题组依据仿生学原理,以环节动物的身体结构、运动原理为基础,以超弹性材料为依托,研究并设计了一款 3 腔道软体爬虫机器人。主要研究工作如下:

1) 将 3 腔道软体驱动器和前后卡脚相结合,设计 3 腔道仿生爬行机器人。

2) 根据机器人一曲一伸周期性运动特性,基于 Yeoh 模型推导出机器人运动步幅与气压的非线性数学预测模型。

3) 进行了有限元仿真和样机试验,并将所得数据与预测值进行比较分析,验证了数学预测模型的有效性。

4) 通过试验验证了爬行机器人的前进、转向和抬头运行的可行性。

该软体机器人具有较好的灵活性、更加简单的结构和良好的力学性能,适用于多种非结构化场景,具有较好的通用性,因此有着重要的研究意义与市场潜力。今后应继续研究爬行机器人各种仿生运动,并将电气控制集成到驱动器内部,实现无线控制。

参考文献:

[1] 黄建龙,解广娟,刘正伟. 基于 Mooney-Rivlin 模型和 Yeoh 模型的超弹性橡胶材料有限元分析[J]. 橡胶工业,2008,55(8):467 - 471.

[2] WALLIN T J,PIKUL J,SHEPHERD R F. 3D printing of soft robotic

systems[J]. Nature Reviews Materials,2018,3(6):84 - 100.

[3] 王田苗,郝雨飞,杨兴帮,等. 软体机器人:结构,驱动,传感与控制[J]. 机械工程学报,2017,53(13):1 - 13.

[4] KURUMAYA S,PHILLIPS B T,BECKER K P,et al. A modular soft robotic wrist for underwater manipulation[J]. Soft Robotics,2018,5(4):399 - 409.

[5] 陈煜宇,刘磊,李博,等. 柔性驱动与刚度可调结构/功能一体化微创手术操作臂设计制造与性能研究[J]. 机械工程学报,2018,54(17):53 - 61.

[6] RANZANI T,CIANCHETTI M,GERBONI G,et al. A soft modular manipulator for minimally invasive surgery:design and characterization of a single module[J]. IEEE Transactions on Robotics,2016,32(1):187 - 200.

[7] LUO M, AGHELI M, ONAL C D. Theoretical modeling and experimental analysis of a pressure-operated soft robotic snake[J]. Soft Robotics,2014,1(2):136 - 146.

[8] ONAL C, RUS D. Autonomous undulatory serpentine locomotion utilizing body dynamics of a fluidic soft robot[J]. Bioinspiration and Biomimetics,2017,8(2):026003.

[9] NEMITZ M P, MIHAYLOV P, BARRACLOUGH T W, et al. Using voice coils to actuate modular soft robots: wormbot, an example[J]. Soft Robotics,2016,3(4):198 - 204.

[10] RENDA F,BOYER F,DIAS J,et al. Discrete cosserat approach for multisection soft manipulator dynamics[J]. IEEE Transactions on Robotics,2018,34(6):1518 - 1533.

[11] SADATI S M H,SHIVA A,ATAKA A,et al. A geometry deformation model for compound continuum manipulators with external loading [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Stockholm, Sweden:IEEE,2016:4957 - 4962.

[信息·简讯]

· 产品信息 ·

西门子推出紧凑型视觉单件分离器

西门子针对中国市场开发了一款超级紧凑的视觉单件分离器,其技术演变基于经过验证的标准视觉单件分离技术。这款令人印象深刻的全新紧凑型视觉单件分离器,空间要求小,可以灵活地集成到全新和现有系统布局之中。在不到 7 m² 的区域内,这一智能的全自动解决方案,每小时可分离处理高达 7,000 件小件包裹,此外它可以快速和流畅地处理大批量不同尺寸、形状以及包装材料的包裹,并为分拣过程中的后续步骤做好准备。目前西门子单件分离器在全球得到广泛应用,其新型紧凑版单件分离器也在中国有了成功应用案例。

西门子物流自动化系统(北京)有限公司首席执行官叶庆说:“凭借创新的紧凑型视觉单件分离器,客户可以从空间节省以及高效技术中获益。西门子不断拓展的产品系列以及可扩展的解决方案大大提高了系统的自动化水平,助力物流企业提高运营能力并节省成本。”

西门子的全自动视觉单件分离器将并排的包裹重新排列成具有设定间距的连续单件包裹流。这将为包裹后续处理步骤如扫描、称重以及分拣做好准备。视觉单件分离器的一个关键要素是基于人工智能的复杂视觉系统,它可以精确地检测每个包裹的形状、大小和位置。这些信息实时传输到控制系统,由该控制系统确定单件分离参数,并相应地调整整个皮带的速度。最终达成的目标是在最小空间内实现对包裹的精确控制以及全自动化单件分离。

除紧凑型视觉单件分离器之外,标准视觉单件分离还提供 2 种配置:包裹视觉单件分离 Visicon Polaris(用于较大和较重包裹)和小件视觉单件分离 Visicon Capella(用于较小和较轻包裹)。

(刘娟娟)