

【据《人工器官》2012年4月报道】题：右心衰竭的机械性循环支持：当今技术和未来展望（综述）

文献出处：Hsu PL et al. Mechanical circulatory support for right heart failure: current technology and future outlook. *Artif Organs* 2012; 36(4): 332-47.

摘要 充血性心力衰竭发病率的日益增高是目前全球范围内的一个重大健康问题，且具有很高的死亡率，特别是心脏切开术后发生的单纯性右心功能不全预后差、死亡率高。左心辅助装置（LVAD）植入和心脏移植术后右心衰竭的发生率可超过40%。到目前为止，以心室辅助装置为形式的机械性心脏辅助已成为终末期患者在无法获得供心时的一种治疗措施。然而，与LVAD技术相比，右心（RV）辅助仍处于早期发展阶段。本篇综述介绍了最新的右心辅助装置（RVAD），包括临床应用中和处于研发中的RVAD。临床应用的RVAD包括体外搏动性血流装置Abiomed BVS 5000 和AB5000、Thoratec PVAD、MEDOS VAD、BerlinHeart Excor；经皮连续血流装置CentriMag 和 TandemHeart系统；以及可植入的Thoratec IVAD。另外，本文也介绍了最新研发的装置，包括无磨损、可植入的DexAide和微创的Impella RD，并讨论了未来成功开发RVAD的前景和思考。

关键词 机械性循环支持；心室辅助装置；右心辅助装置；微创装置；右心衰竭

右心衰竭（RHF）

心力衰竭是一个日益严重的公共健康问题，且心血管疾病已成为世界范围内的一个首要死亡原因，根据2005年的世界卫生报告已占到全球死亡的30%（1）。大多数的心血管疾病都与左心功能失调即左心衰竭（LHF）有关；针对终末期LHF最有效的治疗措施是心脏移植。以心室辅助装置为形式的机械心脏辅助已成为终末期患者在无法获得供心时的一个治疗措施。过去十年中尽管有不同的技术使得LVAD的应用更加可靠且形式多样（2，3），但术后并发症的存在将此

类治疗的获益限制在了病情严重的患者上。根据RHF的定义（4，5），在这些不良事件中LVAD植入和心脏移植术后患者中RHF的发生可达40%以上。当右心功能失调时死亡率可超过70%（6）。表1总结了过去十年LVAD植入术后患者中RHF的发生率、RVAD的植入以及死亡情况。

右心衰竭可定义为中心静脉压升高、中心静脉压升高合并低心排出量、需要RVAD植入或者长期正性药物支持。最常见的RHF原因是心室重构、前负荷和舒张期充盈的改变、正性肌力的下降、左心衰竭引起的后负荷增加、右室心肌缺血、心源性休克、急性肺动脉栓塞、肺动脉高压、脓毒症、急性肺损伤、心包填塞以及心胸术后状态（22）。心脏术后特别是LVAD植入术后心室独立性的改变、肺血管阻力的增加、左室减压和室间隔摆动、右室负荷的改变都可导致右室功能不全发生率升高。预后差被认为与静脉压增高有关，静脉压的增加再加上动脉压的降低可使重要脏器业已受损的氧供更加匮乏，从而导致多器官功能失调甚至衰竭。

RHF的处理包括药物治疗和VAD。虽然RHF的早期治疗偏向于药物治疗包括肺血管扩张剂、正性肌力药物和磷酸二酯酶药物，一些对这些药物治疗无反应的患者需要RVAD的支持（25）。已经证明，RVAD的早期应用可降低中心静脉压、改善终末器官灌注及有效地逆转早期多器官衰竭（26）。然而，目前RVAD系统及植入的并发症已经延迟了RVAD的应用时机。濒危患者RVAD应用时机过晚已经阻碍了临床RHF机械支持的成功（23）。

表1 2000年至2010年LVAD植入术后患者中RHF发生率、RVAD的植入和死亡情况

作者	年份	患者数 (n)	RHF	%	RVAD	%	%*	死亡 率	% [†]
El-Banayosy et al. (7)	2000	165	31	19	N/A		N/A	19	61
Frazier et al. (8)	2001	280	31	11	31	11	100	21	68
Ochiai et al. (9)	2002	245	N/A		23	9	N/A	19	83

Kavarana et al. (10)	2002	69	21	30	1	1	5	9	43
Strauch et al. (11)	2003	40	4	10	0	0	0	N/A	
Aaronson et al. (12)	2003	108	17	16	17	16	100	10	59
Richenbacher et al. (13)	2003	68	9	13	3	4	33	N/A	
Granfeldt et al. (14)	2003	59	11	19	4	7	36	N/A	
Santambrogio et al. (6)	2006	48	8	17	3	6	38	6	75
Schenk et al. (15)	2006	207	48	23	18	9	38	16	33
Matthews et al. (16)	2008	197	68	35	29	15	43	26	38
Pagani et al. (17)	2009	281	53	19	17	6	32	N/A	
Slaughter et al. (18)	2009	192	51	27	8	4	16	12	24
Kormos et al. (19)	2010	484	98	20	30	6	31	24	24
Lee et al. (20)	2010	40	2	5	2	5	100	0	0
Drakos et al. (21)	2010	175	77	44	32	18	42	23	30
Mean±SD (%)			20±10		8±5		44±33		45±24

*所有患者中RVAD植入和RHF发生的比率。N/A，缺失。†RVAD的植入和死亡

机械循环辅助装置

机械性循环支持的定义是：利用机械装置来辅助或者替代心脏射血（27）。与心室替代装置即全人工心脏（total artificial hearts, TAHs）相比，心室辅助装置（VAD）是用来辅助自身心脏的功能。根据VAD所连接的是左心室、右心室或者同时两个心室而分别称为LVAD、RVAD或双心室装置（BiVAD）。

当药物治疗不能控制心衰时VAD用来短期或长期支持衰竭的循环系统，作为心肌恢复的桥梁直至心脏功能充分恢复（bridge to recovery, BTR）或者作为临时辅助以过渡至长期辅助（bridge to bridge, BTB）。当终末期心衰发展至需要心脏移植时，VAD或者TAH用来暂时替代心脏的功能直至获得供体心脏时（bridge to transplantation, BTT）或为非心脏移植候选者提供永久性治疗（destination therapy, DT）。

根据血流类型和一些技术因素，VAD可分为三代。第一代VAD为模拟自身心脏功能的搏动泵，实验已证明搏动泵在较少的正性肌力药物作用下有助于大脑和其它重要器官的灌注（28）。搏动性VAD可与自身心脏同步工作如人工心脏，或者以反搏的形式如主动脉内球囊反搏来工作。然而，由于VAD体积较大且接触和移动部件固有的不稳定性限制了其长期应用，因而主要用于BTT。第二、三代泵为连续性轴流泵，体积显著缩小且稳定性和使用寿命明显改善。这些连续性血流装置可在恒速下运转，达到循环系统所需的平均流量，可进一步分为轴流型、离心型和混合型。目前，新一代轴流泵配备有生理性控制器，使泵在不同的速度下运转，可以提供一定水平的搏动性。第二代VAD使用接触性轴承和/或密封圈，轴承浸于血流中或被密封圈隔离；相比而言，第三代VAD采用的是磁性和/或液动性悬浮产生的非接触性密封圈。当使用主动性磁悬浮时，VAD避免了接触和损耗但控制系统的复杂性和能量消耗却有所增加。主动悬浮系统所需的额外的电力和感受器成分增加了泵的大小且有失功的风险。混合性悬浮（被动性磁性密封和液动性悬浮相结合）和完全液动性悬浮技术已应用于很多新的装置以克服前面提到的缺陷，至今仍处于优化研究中。表2总结了目前VAD系统的分类及优缺点。

表2 三代VAD的特征和相应的优缺点

VAD	血流类型	特征	优点	缺点
第一代	搏动性（正位移，气动或电机械驱动）	瓣膜系统，体积大，很多成分与血液接触	偏向生理条件（搏动性）	体积大，持久性和稳定性差，机械瓣膜处致血栓性，高压区
第二代	连续性（叶轮型，电驱动）	旋转性推进器，轴承和/或密封器直接与血流接触	体积小，创伤性小，稳定、持久	密封问题，泄漏问题
第三代	连续性（叶轮型，电驱动）	旋转性推进器（只有一个移动部分），非接触性轴承	体积小，创伤性小，抗血栓生成，稳定、持久	轴悬浮制造过程复杂，主动性磁性轴承消耗额外的能量，控制复杂

当今右室辅助技术

过去20年内研发了许多辅助受损右心功能的机械辅助装置，包括7个FDA批准的装置（表3）。典型的RVAD运行状态是在40mmHg肺动脉压的条件下达到4L/min的流量（29）。大多数的右心支持是通过右心室/心房至肺动脉连接，或者在需要体外氧合时通过静脉—静脉旁路。根据可植入性将RVAD分为体外型、体旁型和可植入型装置（表3）。

表3 目前根据可植入性RVAD的分类

体外型	体旁型	可植入型
ECMO	Abiomed AB5000 [†]	Impella RD [*]
Abiomed BVS 5000 [†]	MEDOS VAD	Thoratec IVAD [†]

BioMedicus [†]	BerlinHeart Excor	DexAide*
CentriMag [†] , (皮下) [†]	TandemHeart	Thoratec PVAD [†]

* 尚未应用于临床上。 † FDA批准

近来，体外支持如体外膜肺氧合（extracorporeal membrane oxygenation, ECMO）包括一个体外泵和各种旋转离心泵，用于短期减轻右室负荷促进右室功能恢复，或者使患者过渡到其它长期的治疗措施中。这些装置能够通过外周血管经皮植入，从而降低了植入的创伤性，并且有可能应用于病情较重的心衰患者。一些搏动性装置可长期使用，包括体外型如Thoratec PVAD（Thoratec Corp., Pleasanton, CA, USA）（体旁型VAD）、Berlin-Heart Excor（Berlin Heart GmbH, Berlin, Germany）和Abiomed AB5000（Abiomed, Inc., Danvers, MA, USA）（6, 30）；可植入型如植入式Thoratec VAD（IVAD）（Thoratec Corp.）。供RHF长期使用的非搏动性植入型轴流泵也在研发之中，如DexAide RVAD（Cleveland Clinic, Cleveland, OH, USA）（31）。这种三代VAD采用非接触性轴承机制避免磨损、改善血液相容性。适于微创的装置还有正在开发Impella RD（Abiomed, Inc.），这些装置代表了下一代血泵的发展方向。下面详述了这些RVAD目前的研究和发展状态，为将来右心室辅助提供新的研究方向以及设定目标、设计标准。

体外型装置

Abiomed BVS 5000 (Abiomed, Inc.)

Abiomed BVS 5000（Abiomed, Inc.）是一种气动性VAD，能够提供单个心室或双心室的临时体外支持，可提供BTB、BTR或BTT治疗所需的5—6.5L/min的搏动血流（32）。它是第一个FDA批准的用于心脏术后支持的装置。此系统由一个含机械瓣膜的搏动泵、入口插管、出口插管和一个自动驱动控制台组成。当用于右室辅助时32Fr的流入插管置于右房游离壁的中部，10mm人造血管作为动脉插管与主肺动脉的前壁行端侧吻合（图1）。

Morgan等报道了Abiomed BVS 5000（Abiomed, Inc.）作为单个心室或双心

室辅助的情况，共有71个患者、辅助时间小于10天（平均 4.9 ± 4.1 天）（35）。在这组患者中，30名（42.3%）患者植入了RVAD，其中21名（70%）存活下来（心脏恢复后脱机9名，BTB 5名，心脏移植1名）。Samuels等报道了45名患者的应用经验（25例LVAD，10例RVAD和10例BiVAD），其中心脏术后休克36名，心脏术前休克9名，平均8.3天（36）。BVS 5000具有安全、易于操作及监控要求低等优点。然而，此系统需要建立体外循环安放出口插管，因此BVS 5000应用受到限制，仅适用于支持几天的患者，支持时间不超过2周，支持期间患者活动受到限制。目前已知的一个问题是入口插管位置不佳将导致VAD血流量少，需要清除血肿再次定位。辅助期间抗凝，去除设备时需再次手术。

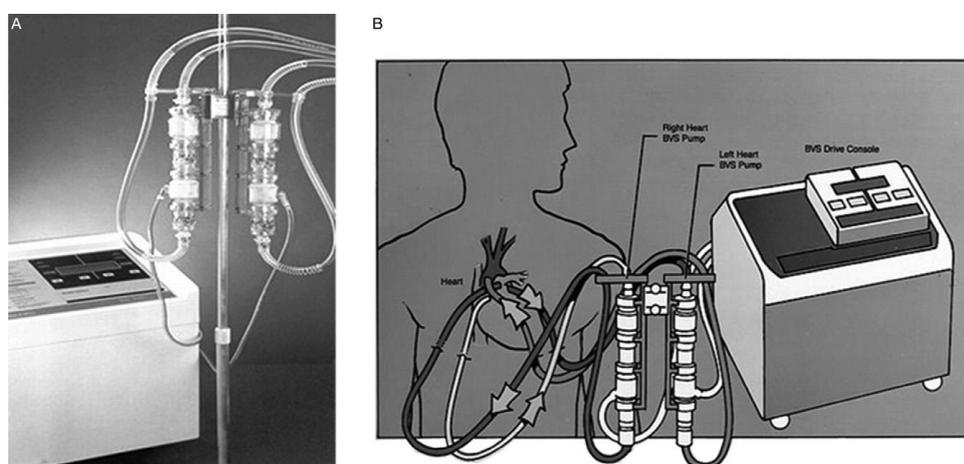


图1 (A) Abiomed BVS 5000搏动泵和完整的自动控制台；(B) BVS 5000管路（图电子版节自[33]和[34].）

BioMedicus 泵 (Medtronic, Inc.)

与各种离心泵相似，BioMedicus 泵 (Medtronic, Inc., Minneapolis, MN, USA) 能够为短期的BTB、BTR和BTT提供左室、右室或双心室辅助，特别是在紧急情况下如急性心源性休克。管路由一个离心泵泵头BP-80、内径为3/8英寸的动脉和静脉管道组成。插管的选择根据病人的特定需要而不同。

急性支持时通常经皮股动、静脉插管转流（图2A）。用作左心辅助时，经右上肺静脉插管至左心房引流至升主动脉。经右房和肺动脉插管提供右室辅助。静脉插管经右心耳尖置入，以便在右心耳和插管周围作几个荷包缝合来降低出血的可能。肺动脉导管可经右室、肺动脉瓣置入或直接经肺动脉插入（37）；

在后一种情况下，由于肺动脉壁薄，因此连接部位易出血，且经常遇到非常高的肺动脉压，这是此管路中的不足之处（26）。图2B描述了BioMedicus管路用于双心室支持的情况。

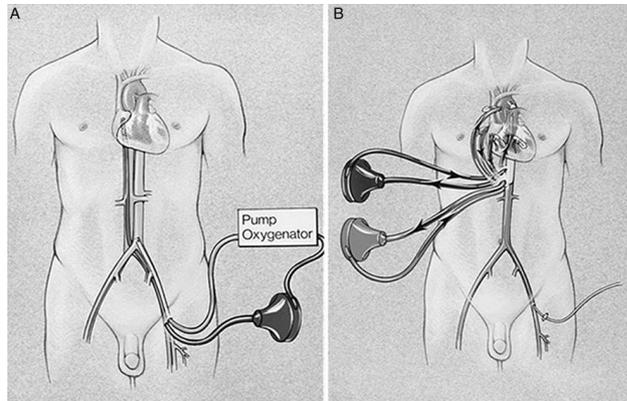


图2 BioMedicus离心泵的插管（37）。

CentriMag (Levitronix LLC)

CentriMag (Levitronix LLC, Waltham, MA, USA) 是一种为BTB、BTR或BTT提供短至中期床旁支持治疗的装置（图3）。它由一个离心泵、电力马达和一个控制台组成。驱动器/旋转器由磁性轴承悬浮起来，因此泵运转时没有机械性轴承和密封。泵流量在5000rpm时能达到9.9L/min。

体外装置通过股一股转流植入，安装和维持的简易性使之在急性心源性休克过渡到长期机械支持、心脏移植的治疗过程中以及正性肌力药物和IABP支持无效时，成为一种受欢迎的治疗选择（38—40）。Sanchez-Lorente等报道，在猪经股静脉或颈静脉单个双腔管(Novalung GmbH, Heilbronn, Germany)插管行全呼吸支持3天。CentriMag (Levitronix LLC) 曾被用于转运静脉-静脉体外肺膜氧合，为肺循环提供充分的血流动力学支持达72h，且无严重的血流动力学、抗凝、细胞或者炎性反应（41）。Bhama等报道，CentriMag泵 (Levitronix LLC) 用于29名心脏术后心源性休克、心脏移植和LVAD长期治疗引起的右室衰竭患者的临时治疗（平均支持时间 8 ± 8 天）时装置的撤除率可达52%（42）。

CentriMag装置也可通过胸骨切开术在右心耳和肺动脉之间插管建立心肺循环。Takayama等报道了一种植入技术，在超过70名患者中允许移动管理，且一些患者支持时间更长（最长144天），在此期间一旦患者的一般情况稳定就可参与步行康复（43）。

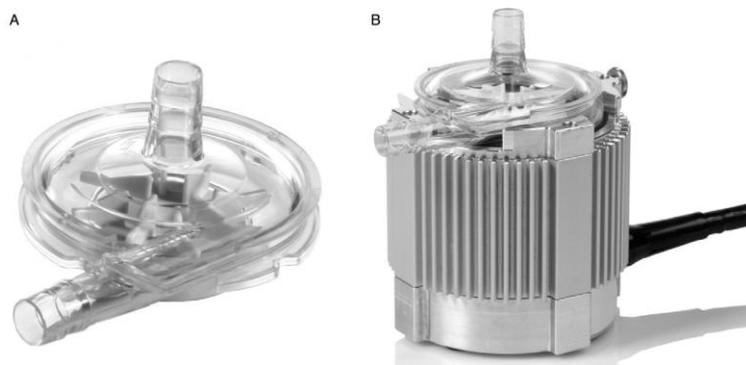


图3 (A) CentriMag泵清晰壳体及离心驱动器。(B) 带有磁性驱动发生器的泵 (Thoratec Corp. 提供)

TandemHeart (CardiacAssist, Inc.)

TandemHeart (CardiacAssist, Inc., Pittsburgh, PA, USA) 是一种经皮VAD, 主要用于高危经皮介入治疗或左室功能不全导致的心源性休克时的左室和右室支持。这种外周VAD (图4) 由一个外置离心泵 (由体外基于微处理器的控制器驱动) 和插管组成, 是FDA批准用于急性心肌梗塞和心源性休克快速循环支持 (BTB和BTR) 的装置, 支持时间从数小时达3周时间。

左室支持时流入管道经房间隔放入左房, 流出道置于股动脉。这种系统能够在6400rpm时流量达4L/min, 如果加大插管直径, 流量可达到8 L/min。右室支持可经皮或经胸完成。

经皮植入时, 右房和肺动脉间的插管通过右侧颈内静脉和股静脉完成。根据插管的大小可给予4-5 L/min (7500rpm时3.4 L/min) 的流量。一般采用股静脉通路, 但是如果第5肋间和股静脉的距离大于标准的插管长度时经右侧颈内静脉置入流出插管 (44)。

Prutkin等报道了一名右心功能不全引起心源性休克的患者TandemHeart (CardiacAssist, Inc.) 作为BTR治疗时的植入情况 (45)。在一名心源性休克患者中TandemHeart (CardiacAssist, Inc.) 作为左心辅助植入, 然后在植入LVAD后转为右室辅助, 辅助流量维持在一个可以接受的右室功能水平 (46)。TandemHeart (CardiacAssist, Inc.) 相关的常见并发症包括植入部位的出血和具有血管病变患者的安装困难 (47, 48)。另外, 因为插管较长, 当流量较低时可能有血栓形成的风险。

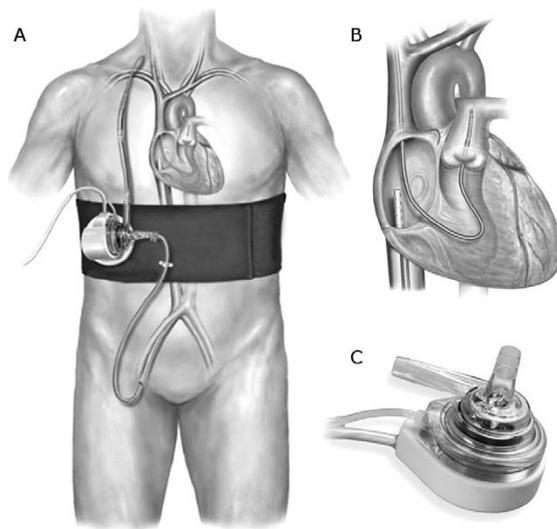


图4 (A) 经皮TandemHeart右室支持时管路，经右颈静脉置入流出插管。(B) 股一股插管时心脏的流入和流出插管。(C) 离心泵的近观图。(CardiacAssist, Inc. 提供)

体旁型装置

Abiomed AB5000 (Abiomed, Inc.)

Abiomed AB5000 (Abiomed, Inc.) 是其前驱BVS 5000的移动版，于2003年被FDA批准用于BTB、BTR和BTT的短期和中期机械辅助治疗。

Abiomed AB5000 (Abiomed, Inc.)流量可达5-6.5 L/min，其清晰的壳体可容纳100mL的血液（图5B）。与BVS 5000类似，Abiomed AB5000的插管也是通过开胸术经心房腔或心室腔（32Fr，36 Fr或42 Fr的流入管路）至肺动脉或主动脉（10或12mm管道）分别用于右室或左室辅助（图5A）。

这种体旁型泵也是气动型，产生搏动血流。Abiomed (Abiomed, Inc.)控制台具有固定的驱动压力：LVAD时为420mmHg，RVAD时为300mmHg。这种BVS 5000和AB5000通用的控制台有助于床旁设备的更换而不需要再次手术。

AB5000也可手术植入，但是接受者的体表面积需大于1.3m²。因此在心脏术后需要再次手术。流入插管内的高速血流喷射引起的高剪切力可引起溶血（49，50），可能也与VAD内的机械瓣膜有关。

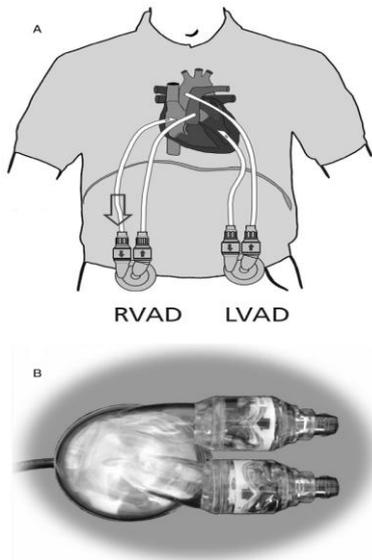


图5 AB5000: (A) 两个AB5000用于双心室辅助时的插管。(B) 泵的壳体(Abiomed, Inc. 供图)

BerlinHeart Excor (Berlin Heart GmbH)

BerlinHeart Excor (Berlin Heart GmbH) 是1992年进入临床应用的气动型体旁型VAD。这种VAD具有控制和驱动控制台，可用于床旁辅助，电池箱提供的时间也达10 h (图6)。能够为BTT和BTR治疗提供短期或长期的左室、右室和双心室辅助。BerlinHeart Excor (Berlin Heart GmbH) 具有三种不同的型号 (50, 60, 80mL) 以适应于不同病人的需要, 且作为小儿辅助也获得了满意的结果(51)。

该系统由一个体旁搏动性隔膜血泵 (流量可达5—6.5L/min)、连接心腔和大血管的插管和电气驱动系统组成。装置的植入需要胸骨切开术, 右心辅助时将流入插管连接至右房, 流出插管连至肺动脉。左心辅助时左心尖插流入管、主动脉插流出管。



图6 双心室辅助的BerlinHeart Excor装置和移动驱动控制台（Berlin Heart GmbH供图）

Medos HIA VAD (MEDOS Medizintechnik GmbH)

与BerlinHeart Excor相似，MEDOS HIA VAD (MEDOS Medizintechnik GmbH, Stolberg, Germany)是一种搏动性体旁VAD，气动型具有泵腔，于1994年引入临床（52）。能够针对BTT和BTR治疗提供短期的急性单个心室和双心室支持。完整的MEDOS VAD 系统(MEDOS Medizintechnik GmbH)由一个泵腔、插管和驱动组成。泵腔从9mL至72mL有四种不同大小的规格（RVAD构造；用于LVAD时大10%），满足从婴儿到成人所有患者的需要。泵透明的壳体内使用了三叶多聚尿烷瓣膜。

MEDOS的VAD (MEDOS Medizintechnik GmbH)像BerlinHeart Excor (Berlin Heart GmbH)一样，其大小型号的多样性主要用于小儿心室辅助，且辅助效果优于ECMO（53）。MEDOS的VAD (MEDOS Medizintechnik GmbH)单纯用于右室支持报道尚未多见；然而，与LVAD联合提供双心室辅助已用于大多数患者人群中。心脏和动脉之间的插管需要胸骨切开术，手术时需要体外循环，辅助期间需要抗凝。

Thoratec体旁型VAD (PVAD) (Thoratec Corp.)

如图7，Thoratec 体旁VAD (PVAD) (Thoratec Corp.)是种气动型装置。自从2010年首次应用于临床以来，全世界作为单心室或双心室辅助应用已超过240个中心和4000名患者。它可为患者康复或过渡至其它不同的治疗（BTB，BTR，BTT）。据报道，当由于解剖原因不能心脏移植时，Thoratec PVAD (Thoratec Corp.)双心室辅助可作为TAH的替代治疗（54）。泵的容积为65mL，可提供5—6.5L/min的搏动血流。临床应用时VAD由床旁的控制台控制和驱动。9.8kg的便携式驱动器可满足出院回家后的移动需要（55）。

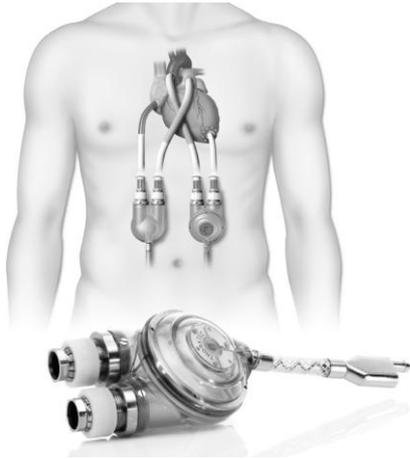


图7 Thoratec PVAD和双心室辅助时的管道(Thoratec Corp. 供图)

可植入性装置

Thoratec implantable VAD (IVAD) (Thoratec Corp.)

如图8, Thoratec IVAD (Thoratec Corp.)是经批准应用于临床的可植入性VAD。它是其前体Thoratec PVAD (Thoratec Corp.)钛合金覆膜版,用来提供中长期心室辅助(图8)。它是唯一一个可植入性、可用于出院病人的双心室辅助装置,适用于心脏术后的康复治疗 and 心脏移植的过渡治疗(BTR和BTT)。IVAD在全球已应用于超过500名需要中长期循环支持的患者(Thoratec Corp. 2010)。Thoratec IVAD由一个能产生4-7L/min流量的气动泵、流入和流出插管及控制台组成。虽然有便携式的控制台便于患者的移动,但大小和重量(9kg)仍然不适于院外应用。

Samuels等报道了9名心脏移植过渡治疗的应用经验,手术全部存活,其中6名为急性心衰,3名慢性心衰(56)。1名患者成功去除了辅助装置,4名出院患者中3名后来接受了心脏移植。

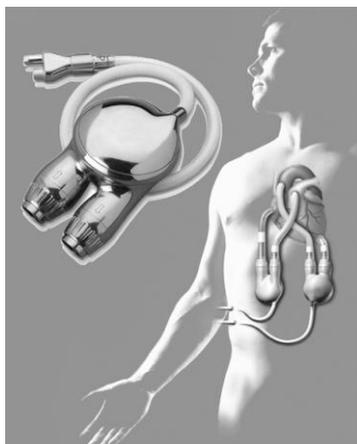


图8 双心室辅助时的Thoratec IVAD和管道(Thoratec Corp. 供图)

DexAide RVAD (Cleveland Clinic)

美国克里夫兰临床中心研制的DexAide RVAD用于右室中长期BTR、BTT或DT治疗的可植入性泵。也可与同单位研制的CorAide LVAD (Cleveland Clinic)联合使用提供双心室辅助(图9)(31)。这种连续血流离心泵装备有非接触性磁性和液动悬浮(第三代血泵),从而避免了机械接触和磨损,减少传统轴承常见的溶血现象。因此,期待DexAide (Cleveland Clinic)能成功用作DT治疗。

DexAide RVAD直径44mm,长度48mm,总容积为69mL。通过开胸术植入胸腔。插管在右室和肺动脉之间。根据动物实验报道,流入插管经左侧或右侧胸腔植入右室,14mm的流出管道与肺动脉连接。泵在转速1800—3200rpm下可提供平均2—6L/min的流量和20—60mmHg的压力升高。根据泵速、流量大小和选择的驱动马达材料能量消耗在7—5.8W之间。活体实验表明,最新的使用医用级氧化锆陶瓷材料的电驱动定子可降低能量消耗20%,2个充满电的电池箱的使用寿命可从9h到超过12h(57)。

体内研究表明装置的生物相容性好,然而在慢性动物实验中插管的堵塞是个主要的并发症,直至流出插管移至右室的膈面(58)。通过使用PTFE材料管道消除了流出管道的内膜增厚问题(57—59)。解剖适宜性研究已经证明,DexAide (Cleveland Clinic)在右侧胸腔内与可植入性LVAD适应良好(60,61)。DexAide (Cleveland Clinic)和周围器官粘连的问题可通过合适的包装技术来解决(61)。

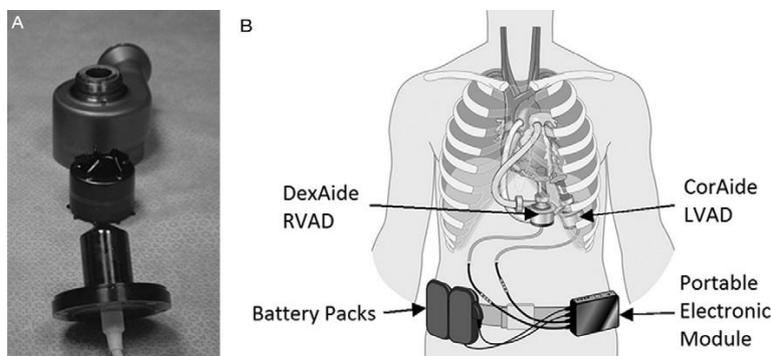


图9 (A)DexAide RVAD和(B) 与CorAide LVAD (Cleveland Clinic)联合应用提供双心室辅助的解剖适应图(来自Fukamachi等[31])

Impella RD (Abiomed, Inc.)

Impella RD (Abiomed, Inc.)是特别用来辅助右心衰竭所研发的微创RVAD。所有Impella系统 (Abiomed, Inc.)由一个含有驱动马达的微轴流泵和一个驱动器组成 (图10)。在Impella家族中,用于左室辅助的Impella Recover 2.5 和 5.0 (Abiomed, Inc.)已于2006年被FDA批准用于临床,而Impella RD (Abiomed, Inc.)尚处于研发阶段,未用于临床。Impella RD (Abiomed, Inc.)直接将右房的非氧合血抽送至肺动脉 (图10A);然而,其机械轴承易于溶血和形成血栓,因此只能短期使用10天。2003年报道了第一例Impella RD (Abiomed, Inc.)的应用,用来治疗合并有右室梗塞和/或心脏术后综合征的心源性休克的暂时性过渡治疗 (62)。2004年Jurmann等联合RVAD和Impella Recover LP (Abiomed, Inc.)为心脏术后心衰提供双心室辅助;Christiansen等2006年报道了Impella成功用于心脏术后发生RHF患者的治疗。Bennett等报道了使用Impella RD (Abiomed, Inc.)作为心脏移至术后发生右心功能不全的BTR治疗 (65)。在安装Impella RD (Abiomed, Inc.)之前,虽然使用了不同的药物和再血管化患者仍不能脱离体外循环。5天时患者自身心功能改善并于第6天撤除辅助装置,患者最终出院。

Impella RD体型小 (直径6.4mm,重量17g)易于安装和撤除,且可经外周或中央途径植入。根据报道的动物实验,辅助装置经右心耳壁的中外侧切口插入右房 (41Fr),24Fr的流出道口于肺动脉瓣以远2cm置入,9-Fr的导管用于驱动线和清洗装置 (66)。泵能在最大转速32500rpm时提供6L/min的流量。可植入性降低了感染的风险。除了导线和冲洗导管整个装置可植入所有大小患者密闭的胸骨内。在辅助期间需要全身抗凝 (66)。一个病例研究报道了在非体外循环下,利用侧夹肺动脉将PTFE动脉移植物与肺动脉行端侧吻合后动脉移植物发生漏血 (67)。

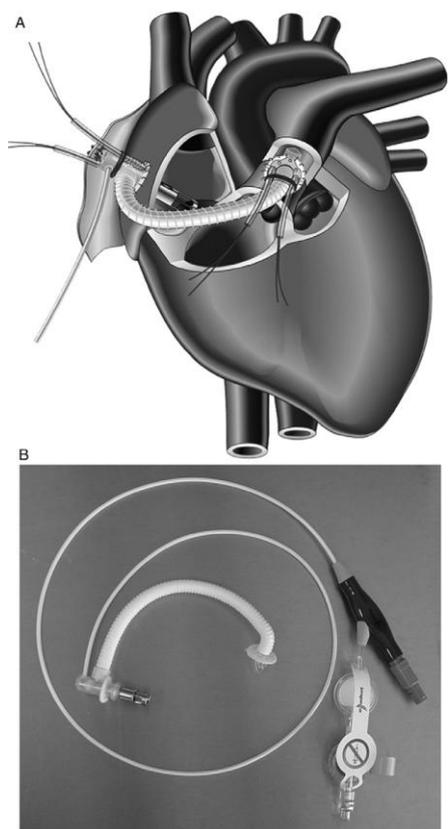


图10 (A) 经右房壁植入肺动脉的The Impella RVAD和(B) 整个泵系统 (Abiomed, Inc. 供图)

表 4 目前 RVAD 的分类

装置	VAD 代 数	血流类型	支持类型	靶向治疗	持			特征	并发症
					短 期	中 期	长 期		
ECMO	二代	持续性(离 心泵)	LVAD, RVAD, BiVAD	BTB, BTR, BTT	+	-	-	体外型; 易于安装	感染; 出血; 使用大导管 时的败血症; 栓塞并发症
TandemHeart	二代	持续性(离 心泵)	LVAD, RVAD, BiVAD	BTB, BTR	+	-	-	体外型; 经皮外周血 管微创植入	感染; 出血; 下肢缺血
Impella RD*	二代	持续性(轴 流泵)	RVAD	BTB, BTR	+	-	-	可经体旁导线植入; 微创植入; 微型轴流转子	全身肝素化; 只能短期使 用

BioMedicus	二代	持续性(离心泵)	LVAD, RVAD, BiVAD	BTB, BTR, BTT	+	-	-	体外型; 无轴承或转动的密封圈; 易于安装; 转流策略多样	出血; 溶血; 肢体缺血的风险; 栓塞并发症
Abiomed BVS 5000	一代	搏动性	LVAD, RVAD, BiVAD	BTB, BTR, BTT	+	-	-	体外型; 操作简单、安全; 监测要求很低	气动控制台大; 患者活动受限; 去除装置需二次手术
CentriMag	三代	持续性(离心泵)	LVAD, RVAD, BiVAD	BTB, BTR, BTT	+	-	-	体外型; 转流策略多样; 磁悬浮式非接触性轴承;	感染; 出血; 需要全身肝

								无损耗和血栓形成	素化； 患者活动受限； 心律失常
MEDOS VAD	一代	搏动性	LVAD, RVAD, BiVAD	BTR, BTT	+	-	-	床旁型； 泵型号多样以适应不同患者 的大小和需要	需要胸骨切 开术； 安装时需要 CPB； 需要抗凝以 防止可能的 血栓形成
Abiomed AB5000	一代	搏动性	LVAD, RVAD, BiVAD	BTB, BTR, BTT	+	+	-	床旁型； 与 BVS 5000 兼容(可床旁更 换而不需再次手术)	气动控制台 大； 受者的体表 面积要大于 1.3m ²

									心脏术后时 需要再次手 术; 流入插管内 的溶血
Thoratec PVAD	一代	搏动性	LVAD, RVAD, BiVAD	BTR, BTT	+	+	-	床旁型;	气动控制台 大; 需要全身抗 凝; 需要胸骨切 开术
BerlinHeart Excor	一代	搏动性	LVAD, RVAD, BiVAD	BTR, BTT	+	+	+	床旁型; 泵型号多样以适应不同患者 的大小和需要	气动控制台 大; 需要全身抗 凝;

									安装时需要 CPB
Thoratec IVAD	一代	搏动性	LVAD, RVAD, BiVAD	BTR, BTT, DT	-	+	+	可植入; Thoralon 血液接触表面以降 低溶血和血栓形成	同 Thoratec PVAD; 安装时间更 长; 侵袭性手术
DexAide*	三代	持续性(离 心泵)	RVAD	BTR, BTT, DT	-	+	+	可植入; 复合型悬浮(液动和被动性 磁轴承); 可与其它装置(CorAide)联 合提供双心室辅助	需要胸骨切 开术

短期支持: <1个月; 中期支持: 30天-1年; 长期支持: >1年。*: 装置尚为应用于临床。关键词: L-, R-, Bi-VAD: 左-, 右-, 双心室辅助装置; BTB: 桥接治疗; BTR: 康复过渡治疗; DT: 永久性治疗

讨论

根据RVAD的功能、技术构造以及辅助的时间、类型，表4总结了本文中RVAD的一般分类。近来的经皮辅助可以微创经外周血管股静脉或颈静脉植入，从而避免了心脏粘连的广泛游离和体外循环（44，68—70）。尽管现在的经皮机械辅助系统能用，但它们的并发症如植入部位的出血、导管内血栓形成的可能性等限制了其只能用于短—中期辅助或紧急情况如心源性休克。一些搏动性系统如Abiomed AB5000 (Abiomed, Inc.)和Thoratec PVAD (Thoratec Corp.)可提供较长时期的辅助，但是气型驱动和自动控制台一般较大，故患者的移动性受到限制。另外，高压区如搏动装置的机械瓣膜处易于溶血。

因此，大多数的RVAD用作心脏术后和LVAD植入后RHF的短期BTB或BTT/BTR治疗。Moazami等研究表明，在很多的心脏术后患者中，经暂时的机械辅助后（少于1周）可达到BTR治疗，且尽管存在严重的右室功能不全但右室功能可恢复维持合适的心输出量（71）。存在的右室功能不全的长期影响尚不清楚。

一般认为，长期的RVAD增加心功能恢复的机会，或延长心脏移植患者的等待时间。但是文献尚未报道RVAD的长期应用或作为DT治疗。目前临床可用的长期RVAD只有BerlinHeart Excor (Berlin Heart GmbH)和Thoratec IVAD (Thoratec Corp.)（表4），其缺点是这些泵为气动型，体积较大不适于院外使用。然而据报道，一些LVAD如Heartware HVAD (HeartWare Inc., Framingham, MA, USA) 可用来支持右心功能(72)。但是，这些机械循环辅助系统是用于左室或双心室辅助的，因此需要较大的驱动器和较高的驱动压来维持体循环，故对于肺循环来说这些辅助系统型号过大。因此，需要一些修改如流出管道的带缩、降低泵速和缩短流入插管来辅助右室同时避免流量的不平衡或者室间隔的吸引（73）。

由于现在VAD的设计更加注重可携带性和可植入性，将来会研究出供长期应用的辅助装置。侵袭性的植入方法包括正中胸骨切开术和胸廓切开术需要大的手术和高度专业的心脏外科医生。插管也对心脏有创伤。因此这种侵袭性限制了在重症患者人群的应用。文献报道了多种不同的外科方法来减低植入时的侵袭性（69，70，74）。然而，装置本身构型引起的并发症如经皮装置的出血或者插管内的血栓形成减缓了RVAD的使用。进一步研究表明，机械循环辅助过晚与

较低的生存率相关，因为当患者的病情恶化时心功能恢复的机会严重降低（75，76）。据报道，5名患者长期LVAD植入后Levitronix CentriMag (Levitronix LLC) RVAD辅助的住院死亡率达到100%，因此作者推荐早期使用RVAD以提高脱机/存活率（40）。Nosé等报道，上期心室辅助系统的使用引入了BTR的概念，而BTR在有限的患者群中已成为一个可能的作用过程，虽然仍然不可预知（77）。永久性辅助已经成为一个现实的治疗手段，能显著地患者心衰的症状和稳定地改善生活质量。

至今为止，在心衰患者中单纯RVAD的植入率与LVAD（50.6%）和BiVAD（47.9%）相比仍较低为1.5%（78）。主要的问题包括RHF发生的预测困难、操作的侵袭性、术后的并发症、RVAD植入前的多个手术以及和LVAD功能使用时的解剖适应问题（9，16）。大量的研究投入到小的、相对易于植入的左室辅助装置的研发中（79）。Impella LP (Abiomed, Inc.)的经验已证明，简单的经皮植入降低了操作或装置相关的并发症如血栓或感染（80）。Synergy Pocket Micro-Pump 系统 (CircuLite GmbH, Aachen, Germany)是设计用来为NYHA III级心衰患者提供部分左室辅助（2—3.5L/min）（81）；这种泵的植入和插管侵袭性低因此为心室的恢复提供了合适的环境（82）。HeartWare HVAD (HeartWare, Inc.)去除了流入管道减小了体积，从而显著降低了血液接触面积。另外，HVAD的非接触性轴承机制降低了血栓形成和血液损伤的发生率。

因此需要研发能够为RHF患者提供部分或完整循环支持的微侵袭性辅助装置。这种装置应该易于植入血流内而不需要大的手术如经外周血管，从而能够提供灵活的治疗，促进早期使用RVAD。相信这样能够降低严重RHF可能的发生率，特别是在LVAD植入后的患者中。它也可使经历多次心脏手术的患者、需要暂时性辅助的患者以及使用LVAD的患者受益。当RVAD使用足够早，心脏恢复是可能的。

未来展望

至今为止，与LHF相比，对RHF治疗的注意很少。RHF的发展特别是LVAD植入后可导致严重的发病率和死亡率。与非RHF患者相比，RHF患者具有更高的早期死亡率、更长的ICU时间、再次手术止血和肾衰的发病率更高以及明显低的心脏

移植过渡率（83）。

尽管心血管支持有很多的革新，但右心辅助仍处于早期发展阶段。目前研发的体外装置具有一定的并发症如血液相容性差、感染率高、长期持久性差、需要抗凝、长的住院时间和生活质量下降。这些问题限制了体外经皮系统，仅用于短期支持。一些体旁型和可植入型装置可提供长期支持，但是需要侵袭性操作，因此，它们只有当所有的治疗都无效时，作为重症患者的最后一种选择。右室辅助的发展特别是能提供急性和长期支持的微创装置还有很大的空间。这种装置应该能够为急性心脏术后心衰的肺循环提供短期支持，同时为BTR和BTT患者提供中长期支持。植入和去除的方式简单会促进更多的患者早期应用辅助装置。另外，最少的并发症和泵系统的简易性允许患者在等待心脏移植时院外应用或者最终成为DT治疗。为了实现将来右心辅助装置，推荐以下的设计条件：

- 能够维持充分的肺灌注
- 无需插管
- 微创植入操作/易于更换/去除
- 大小（长度小于25mm，直径小于7mm）适于外周途径和经弯曲血管的递送。
- 直接增加心输出量或者直接心室减负荷
- 和左心保持流量平衡
- 控制法则以适应患者的生理需求
- 设计促进长期应用（>1年）、降低血栓形成
- 方便患者移动的简洁而强力的驱动系统

本篇综述介绍了当今右室机械辅助技术，并为该领域未来发展提供了一套设计标准。作者们相信努力研究微创、能长期使用以及有效减轻心室负荷的辅助装置将会使更多的RHF患者受益。

参考文献

1. World Health Organization. Cardiovascular diseases (CVDs). Available at: http://www.who.int/cardiovascular_diseases. Accessed October 20, 2011.
2. Park SJ, Tector A, Piccioni W, et al. Left ventricular assist devices as destination therapy: a new look at survival. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2005;129:9–17.
3. Rose E, Gelijns A, Moskowitz A, et al. Long-term use of a left ventricular assist device for end-stage heart failure. *N Engl J Med* 2001;345:1435–43.
4. Furukawa K, Motomura T, Nosé Y. Right ventricular failure after left ventricular assist device implantation: the need for an implantable right ventricular assist device. *Artif Organs*

2005;29:369–77.

5. Reesink K, Dekker A, Van der Nagel T, et al. Physiologicinsensitive left ventricular assist predisposes right-sided circulatory failure: a pilot simulation and validation study. *Artif Organs* 2004;28:933–9.
6. Santambrogio L, Bianchi T, Fuardo M, et al. Physiologicinsensitive left ventricular assist predisposes right-sided circulatory failure: a pilot simulation and validation study. *Interact Cardiovasc Thorac Surg* 2006;5:379–82.
7. El-Banayosy A, Arusoglu L, Kizner L, Fey O, Minami K, Körfer R. Complications of circulatory assist. *Perfusion* 2000;15:327–31.
8. Frazier OH, Rose EA, Oz MC, et al. Multicenter clinical evaluation of the HeartMate vented electric left ventricular assist system in patients awaiting heart transplantation. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2001;122:1186–95.
9. Ochiai Y, McCarthy PM, Smedira NG, et al. Predictors of severe right ventricular failure after implantable left ventricular assist device insertion: analysis of 245 patients. *Circulation* 2002;106:I-198–202.
10. Kavarana MN, Pessin-Minsley MS, Urtecho J, et al. Right ventricular dysfunction and organ failure in left ventricular assist device recipients: a continuing problem. *Ann Thorac Surg* 2002;73:745–50.
11. Strauch JT, Spielvogel D, Haldenwang PL, et al. Recent improvements in outcome with the Novacor left ventricular assist device. *J Heart Lung Transplant* 2003;22:674–80.
12. Aaronson KD, Patel H, Pagani FD. Patient selection for left ventricular assist device therapy. *Ann Thorac Surg* 2003;75:S29–35.
13. Richenbacher WE, Naka Y, Raines EP, et al. Surgical management of patients in the REMATCH trial. *Ann Thorac Surg* 2003;75(Suppl. 1):S86–92.
14. Granfeldt H, Koul B, Wiklund L, et al. Risk factor analysis of Swedish left ventricular assist device (LVAD) patients. *Ann Thorac Surg* 2003;76:1993–8.
15. Schenk S, McCarthy PM, Blackstone EH, et al. Duration of inotropic support after left ventricular assist device implantation: risk factors and impact on outcome. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2006;131:447–54.
16. Matthews JC, Koelling TM, Pagani FD, Aaronson KD. The right ventricular failure risk score: a pre-operative tool for assessing the risk of right ventricular failure in left ventricular assist device candidates. *J Am Coll Cardiol* 2008;51:2163–72.
17. Pagani FD, Miller LW, Russell SD, et al. Extended mechanical circulatory support with a continuous-flow rotary left ventricular assist device. *J Am Coll Cardiol* 2009;54:312–21.
18. Slaughter MS, Rogers JG, Milano CA, et al. Advanced heart failure treated with continuous-flow left ventricular assist device. *N Engl J Med* 2009;361:2241–51.
19. Kormos RL, Teuteberg JJ, Pagani FD, et al. Right ventricular failure in patients with the HeartMate II continuous-flow left ventricular assist device: incidence, risk factors, and effect on outcomes. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2010;139:1316–24.
20. Lee S, Kamdar F, Madlon-Kay R, et al. Effects of the HeartMate II continuous-flow left ventricular assist device on right ventricular function. *J Heart Lung Transplant* 2010;29:209–15.
21. Drakos SG, Janicki L, Horne BD, et al. Risk factors predictive of right ventricular failure after left ventricular assist device implantation. *Am J Cardiol* 2010;105:1030–5.
22. Lahm T, McCaslin CA, Wozniak TC, et al. Medical and surgical treatment of acute right

- ventricular failure. *J Am Coll Cardiol* 2010;56:1435–46.
23. Abu-Omar Y, Tsui SSL. Mechanical circulatory support for AMI and cardiogenic shock. *J Card Surg* 2010;25:434–41.
 24. Farrar DJ, Compton PG, Hershon JJ, Hill JD. Right ventricular function in an operating room model of mechanical left ventricular assistance and its effects in patients with depressed left ventricular function. *Circulation* 1985;72:1279–85.
 25. Radovancevic B, Gregoric ID, Tamez D, et al. Biventricular support with the Jarvik 2000 axial flow pump: a feasibility study. *ASAIO J* 2003;49:604–7.
 26. Chen JM, Levin HR, Rose EA, et al. Experience with right ventricular assist devices for perioperative right-sided circulatory failure. *Ann Thorac Surg* 1996;61:305–10.
 27. Deng MC, Naka Y. *Mechanical Circulatory Support Therapy in Advanced Heart Failure*. London: Imperial College Press, 2007.
 28. Nosé Y, Yoshikawa M, Murabayashi S, Takano T. Development of rotary blood pump technology: past, present, and future. *Artif Organs* 2000;24:412–20.
 29. Behbahani M, Behr M, Hormes M, et al. A review of computational fluid dynamics analysis of blood pumps. *Eur J Appl Math* 2009;20:363–97.
 30. Magliato KE, Kleisli T, Soukiasian HJ, et al. Biventricular support in patients with profound cardiogenic shock: a single center experience. *ASAIO J* 2003;49:475–9.
 31. Fukamachi K, Horvath DJ, Massiello AL, et al. Development of a small implantable right ventricular assist device. *ASAIO J* 2005;51:730–5.
 32. Couper GS, Dekkers RJ, Adams DH. The logistics and cost-effectiveness of circulatory support: advantages of the Abiomed BVS 5000. *Ann Thorac Surg* 1999;68:646–9.
 33. Cardiac Surgery, University of Michigan. Circulatory & ventricular assist devices (VAD). Available at: <http://surgery.med.umich.edu/cardiac/patient/adult/ccs/vad.shtml>. Accessed January 26, 2011.
 34. Jett GK. Abiomed BVS 5000: experience and potential advantages. *Ann Thorac Surg* 1996;61:301–4.
 35. Morgan JA, Stewart AS, Lee BJ, Oz MC, Naka Y. Role of the Abiomed BVS 5000 device for short-term support and bridge to transplantation. *ASAIO J* 2004;50:360–3.
 36. Samuels LE, Holmes EC, Thomas MP, et al. Management of acute cardiac failure with mechanical assist: experience with the Abiomed BVS 5000. *Ann Thorac Surg* 2001;71:S67–72.
 37. Noon GP, Lafuente JA, Irwin S. Acute and temporary ventricular support with BioMedicus centrifugal pump. *Ann Thorac Surg* 1999;68: 650–4.
 38. Villavicencio M, Larrea R, Larraín E, et al. Four-week Levitronix CentriMag bridge-to-transplant for post myocardial infarction cardiogenic shock. A case report. *Rev Med Chil* 2010;138:752–7.
 39. Loforte A, Potapov E, Krabatsch T, et al. Levitronix CentriMag to Berlin Heart Excor: a “bridge to bridge” solution in refractory cardiogenic shock. *ASAIO J* 2009;55:465–8.
 40. Shuhaiber JH, Jenkins D, Berman M, et al. The Papworth experience with the Levitronix CentriMag ventricular assist device. *J Heart Lung Transplant* 2008;27:158–64.
 41. Sanchez-Lorente D, Go T, Jungebluth P, et al. Single double-lumen venous–venous pump-driven extracorporeal lung membrane support. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2010;140:558–63.
 42. Bhama JK, Kormos RL, Toyoda Y, Teuteberg JJ, McCurry KR, Siegenthaler MP. Clinical experience using the Levitronix CentriMag system for temporary right ventricular mechanical

- circulatory support. *J Heart Lung Transplant* 2009;28:971–6.
43. Takayama H, Chen JM, Jorde UP, Naka Y. Implantation technique of the CentriMag biventricular assist device allowing ambulatory rehabilitation. *Interact Cardiovasc Thorac Surg* 2011;12:110–1.
 44. Kiernan MS, Krishnamurthy B, Kapur NK. Percutaneous right ventricular assist via the internal jugular vein in cardiogenic shock complicating an acute inferior myocardial infarction. *J Invasive Cardiol* 2010;22:23–6.
 45. Prutkin JM, Strote JA, Stout KK. Percutaneous right ventricular assist device as support for cardiogenic shock due to right ventricular infarction. *J Invasive Cardiol* 2008;20:E215–6.
 46. Takagaki M, Wurzer C, Wade R, et al. Successful conversion of TandemHeart left ventricular assist device to right ventricular assist device after implantation of a HeartMate XVE. *Ann Thorac Surg* 2008;86:1677.
 47. Greenberg B, Czarska B, Delgado RM, et al. Effects of continuous aortic flow augmentation in patients with exacerbation of heart failure inadequately responsive to medical therapy: results of the Multicenter Trial of the Orqis Medical Cancion System for the Enhanced Treatment of Heart Failure Unresponsive to Medical Therapy (MOMENTUM). *Circulation* 2008;118:1241–9.
 48. Neuzil P, Kmonicek P, Skoda J, Reddy VY. Temporary (shortterm) percutaneous left ventricular assist device (Tandem Heart) in a patient with STEMI, multivessel coronary artery disease, cardiogenic shock and severe peripheral artery disease. *Acute Card Care* 2009;11:146–50.
 49. Samuels LE, Holmes EC, Garwood P, Ferdinand F. Initial experience with the Abiomed AB5000 ventricular assist device system. *Ann Thorac Surg* 2005;80:309–12.
 50. Bogaev RC, Schnitzler RN, Otero C. Hemolysis due to high shear rates at the inflow cannula site of the AB 5000 ventricle device. *ASAIO J* 2004;50:134.
 51. Hetzer R, Alexi-Meskishvili V, Weng Y, et al. Mechanical cardiac support in the young with the Berlin Heart EXCOR pulsatile ventricular assist device: 15 years' experience. *Semin Thorac Cardiovasc SurgPediatr Card SurgAnnu*2006;9:99–108.
 52. Rakhorst G, Hensens AG, Verkerke GJ, et al. In-vivo evaluation of the “HIA-VAD”: a new German ventricular assist device. *Thorac Cardiovasc Surg* 1994;42:136.
 53. Arab á FA, Tsau PH, Smith RG, et al. Pediatric bridge to heart transplantation: application of the Berlin Heart, Medos and Thoratec ventricular assist devices. *J Heart Lung Transplant* 2006;25:16–21.
 54. Kärfer R, El Banayosy A, Morshuis M, Tenderich G, Reiss N, Arusoglu L. Total artificial heart-implantation technique using the CardioWest or the Thoratec system. *Multimed Man Cardiothorac Surg* 2007;2007:2485.
 55. Thoratec Corp. Thoratec PVAD & Thoratec IVAD fact sheet. 2011.
 56. Samuels LE, Holmes EC, Hagan K, Gopalan R, Droogan C, Ferdinand F. The Thoratec implantable ventricular assist device (IVAD): initial clinical experience. *Chest* 2006;130:188.
 57. Fukamachi K, Saeed D, Massiello AL, et al. Development of DexAide right ventricular assist device: update II. *ASAIO J* 2008;54:589–93.
 58. Ootaki Y, Saeed D, Ootaki C, et al. Development of the DexAide right ventricular assist device inflow cannula. *ASAIO J* 2008;54:31–6.
 59. Ootaki Y, Kamohara K, Akiyama M, et al. Initial in vivo evaluation of the DexAide right ventricular assist device. *ASAIO J* 2005;51:739–42.
 60. Ootaki Y, Ootaki C, Kamohara K, et al. Cadaver fitting study of the DexAide right ventricular

- assist device. *Artif Organs* 2007;31:646–58.
61. Ootaki Y, Ootaki C, Massiello A, et al. Human clinical fitting study of the DexAide right ventricular assist device. *Artif Organs* 2009;33:558–61.
 62. Christiansen S, Brose S, Demircan L, Autschbach R. A new right ventricular assist device for right ventricular support. *Eur J Cardiothorac Surg* 2003;24:834–6.
 63. Jurmann MJ, Siniawski H, Erb M, Drews T, Hetzer R. Initial experience with miniature axial flow ventricular assist devices for postcardiotomy heart failure. *Ann Thorac Surg* 2004;77:1642.
 64. Christiansen S, Dohmen G, Autschbach R. Treatment of right heart failure with a new microaxial blood pump. *Asian Cardiovasc Thorac Ann* 2006;14:418–21.
 65. Bennett MT, Virani SA, Bowering J, Ignaszewski A, Kaan A-MF, Cheung A. The use of the Impella RD as a bridge to recovery for right ventricular dysfunction after cardiac transplantation. *Innovations: Technology & Techniques in Cardiothoracic & Vascular Surgery* 2010;5:369–71.
 66. Christiansen S, Perez-Bouza A, Reul H, Autschbach R. In vivo experimental testing of a microaxial blood pump for right ventricular support. *Artif Organs* 2006;30:94–100.
 67. Tevæarai HT, Schmidli J, Mohacsi P, Rothen H-U, Eckstein FS, Carrel TP. Leakage of the arterial prosthesis of an Impella RVAD. *Ann Thorac Surg* 2006;82:1527–9.
 68. Wirtz SP, Schmidt C, Van Aken H, et al. Temporary right heart support with percutaneous jugular access. *Ann Thorac Surg* 2006;81:701–5.
 69. Strauch JT, Franke UFW, Madershahian N, Wahlers T. Right ventricular assist device implantation—a new transcatheter approach. *Thorac Cardiovasc Surg* 2004;52:378–9.
 70. Stepanenko A, Potapov EV, Krabatsch T, Hetzer R. Simple implantation of a temporary right ventricular device for right ventricular failure after left ventricular device implantation via a left lateral thoracotomy. *ASAIO J* 2011;57:17–8.
 71. Moazami N, Pasque MK, Moon MR, et al. Mechanical support for isolated right ventricular failure in patients after cardiectomy. *J Heart Lung Transplant* 2004;23:1371–5.
 72. Strueber M, Meyer A, Malehsa D, Haverich A. Successful use of the HeartWare HVAD rotary blood pump for biventricular support. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2010;140:936–7.
 73. Krabatsch T, Hennig E, Stepanenko A, et al. Evaluation of the HeartWare HVAD centrifugal pump for right ventricular assistance in an in vitro model. *ASAIO J* 2011;57:183–7.
 74. Minami K, Bonkohara Y, Arusoglu L, El-Banayosy A, Körfer R. New technique for the outflow cannulation of right ventricular assist device. *Ann Thorac Surg* 1999;68:1092–3.
 75. Rodrigus IE, Amsel BJ, Conraads V, De H. Emergency ventricular assist device: better survival rates in non-post cardiectomy-related cardiogenic shock. *Acta Chir Belg* 2001;101:226–31.
 76. Marquez TT, D’Cunha J, John R, Liao K, Joyce L. Mechanical support for acute right ventricular failure: evolving surgical paradigms. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2009;137:e39–40.
 77. Nosé Y. Ventricular assist devices for bridge to myocardial repair. *Artif Organs* 2008;32:899–902.
 78. Potapov EV, Loforte A, Weng Y, et al. Experience with over 1000 implanted ventricular assist devices. *J Card Surg* 2008;23:185–94.
 79. Mitamura Y, Nakamura H, Okamoto E, Yozu R, Kawada S, Kim DW. Development of the valvo pump: an axial flow pump implanted at the heart valve position. *Artif Organs* 1999;23:566–71.
 80. Lam K, Sjaauw KD, van der Meulen J, et al. A combined surgical and percutaneous approach

through the axillary artery to introduce the Impella LP5.0 for short-term circulatory support. *Int J Cardiol* 2009;134:277–9.

81. Krishnamani R, DeNofrio D, Konstam MA. Emerging ventricular assist devices for long-term cardiac support. *Nat Rev Cardiol* 2010;7:71–6.

82. Meyns B, Verbeken E, Kerkhoffs W, et al. Partial support for chronic heart failure with a subcutaneous pump. *J Heart Lung Transplant* 2006;25:s123–4.

83. Dang NC, Topkara VK, Mercado M, et al. Right heart failure after left ventricular assist device implantation in patients with chronic congestive heart failure. *J Heart Lung Transplant* 2006;25:1–6.