



■ 许 焰 著

大间隙磁力传动系统的 驱动性能及设计应用

煤炭工业出版社

大间隙磁力传动系统的驱动 性能及设计应用

许 焰 著

煤 炭 工 业 出 版 社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

大间隙磁力传动系统的驱动性能及设计应用/许焰著. --北京:
煤炭工业出版社, 2011

ISBN 978-7-5020-3825-0

I. ①大… II. ①许… III. ①磁力驱动泵 IV. ①TH3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 046383 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
网址: www.cciph.com.cn
北京房山宏伟印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*

开本 880mm × 1230mm^{1/32} 印张 5^{3/4}
字数 148 千字 印数 1—700
2011 年 5 月第 1 版 2011 年 5 月第 1 次印刷
社内编号 6635 定价 18.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

内 容 提 要

大间隙磁力传动系统在轴流式血泵体外磁场驱动、推动微型轴流式血泵的临床应用等方面具有广阔的应用前景。本书围绕行波磁场与永磁齿轮的磁场相耦合、驱动永磁齿轮旋转的大间隙磁力传动系统方案,研究了系统的驱动方案、空间磁场、驱动力矩、矩角特性、动态特性等关键理论,并对大间隙磁力传动系统进行了设计应用。

本书可作为磁力机械教学和科研人员的参考书,也可作为广大磁力传动系统和血泵驱动系统的具体设计和使用者的参考书。

前 言

磁力传动技术是应用永磁材料或电磁机构所产生的磁力作用,实现力或力矩非接触式传递的一种技术。在小间隙条件下磁力传动技术的研究与应用已十分广泛,但大间隙条件下磁力传动技术的研究较少。永磁轴流式血泵外磁场驱动属于大间隙磁力传动技术的范畴,它有助于实现血泵的微型化,现已成为血泵驱动技术研究的热点。然而由于其实际的磁极间隙远大于经典磁力传动所设定的范围,存在着系统空间磁场与驱动力矩随磁极间隙增大而迅速减小的难题,因此限制了大间隙条件下磁力传动技术的研究与应用。

本书以实现大间隙条件下磁力传动技术的应用、推动微型轴流式血泵的临床化为目标,提出一种基于行波磁场与永磁齿轮的磁场相耦合、驱动永磁齿轮旋转的大间隙磁力传动系统方案,研究系统驱动方案、空间磁场、驱动力矩、矩角特性、动态特性等关键理论,设计永磁轴流式血泵大间隙磁力传动系统,进行系统空间磁场和驱动力矩实验研究。研究结果对设计具有较强驱动能力的、适用于永磁轴流式血泵驱动及类似应用场合的大间隙磁力传动系统具有指导价值。

在本书的成书过程中,中南大学谭建平教授给予了细致的指导,并提出了修改意见;中南大学测控实验室与清华大学航空航天学院张锡文教授为本书中的实验部分提供了研究条件;刘云龙博士、刘志坚硕士、刘恒拓硕士、祝忠彦硕士等协助作者进行了相关内容的研究;长沙学院机电工程学院庞佑霞教授等对本书也曾提出了修改建议,在此一并表示衷心的感谢!

最后衷心感谢科技部国家高技术研究发展计划(863)、国家自然科学基金、教育部博士点基金和长沙学院科研基金的资助!

对于书中存在的缺点和错误,敬请读者批评指正。

著 者

2011年2月

目 次

1	概论	1
1.1	引言	1
1.2	血泵及其驱动技术研究现状	2
1.3	磁力传动技术研究现状	16
2	大间隙磁力传动系统的方案设计与仿真	24
2.1	驱动对象及研究方法	24
2.2	大间隙磁力传动系统的驱动方案仿真	28
2.3	大间隙磁力传动系统的驱动力矩仿真	36
2.4	大间隙磁力传动系统设计	44
2.5	本章小结	67
3	大间隙磁力传动系统的空间磁场	68
3.1	磁场建模的相关物理量及定律	68
3.2	系统空间磁场建模过程的简化	72
3.3	单匝通电线圈空间磁场数学模型	73
3.4	系统空间磁场数学模型	79
3.5	系统空间磁场分布规律	84
3.6	本章小结	90
4	大间隙磁力传动系统的驱动力矩	92
4.1	永磁齿轮驱动力矩的计算方法	92
4.2	系统驱动力矩计算模型	95
4.3	系统主要参数对驱动力矩的影响规律	101
4.4	本章小结	110
5	大间隙磁力传动系统的矩角特性	111
5.1	系统矩角特性的研究基础	111
5.2	系统矩角特性计算模型	115

5.3	系统主要参数对矩角特性的影响规律	119
5.4	系统运行稳定性分析	124
5.5	本章小结	125
6	大间隙磁力传动系统的动态特性	126
6.1	动力学仿真软件的对比与选择	126
6.2	三维建模软件 Pro/E 及接口模块 Mech/Pro 简介	129
6.3	血泵转子虚拟样机模型的建立	131
6.4	大间隙磁力传动系统驱动力矩求解	136
6.5	血泵负载力矩经验模型	137
6.6	血泵加速过程的动态特性仿真研究	138
6.7	本章小结	143
7	大间隙磁力传动系统的设计应用	144
7.1	实验装置的搭建	144
7.2	系统空间磁场实验研究	149
7.3	系统驱动力矩实验研究	156
7.4	本章小结	160
8	结论	162
	参考文献	166

1 概 论

1.1 引言

磁力传动技术是应用永磁材料或电磁机构所产生的磁力作用,实现力或力矩非接触式传递的一种新技术。20 世纪 70 年以来,磁力传动技术在工业和医学领域的研究与应用得到了较快发展^[1]。例如,工业领域的磁力泵、磁力齿轮、磁力涡轮、磁力联轴器、磁力轴承、磁力间歇机构和磁力弹簧等,医学领域的各种内窥镜和胃肠道机器人驱动技术等,但这些应用都是基于在磁极间距为小间隙(气隙)的条件下实现的,对于大间隙条件下的磁力传动理论及技术较少有研究工作涉及^[2]。

在特定的条件下,实际或期望的磁极间隙远大于经典磁力传动所设定的范围。永磁轴流式血泵外磁场驱动方式由于具有非接触、大间隙传动方式等特点,能实现血泵微型化、提高病人生活质量等优势,从而具有极大的诱惑力,但由于存在着系统磁力矩随着磁极间隙的增大而迅速减小、能量传递效率明显降低的难题,限制了该方式的技术实现。

本书以非接触式永磁轴流式血泵外磁场驱动为背景,提出一种基于行波磁场与永磁齿轮的磁场相耦合、驱动永磁齿轮旋转的大间隙磁力传动系统方案,研究系统的驱动方案、空间磁场、驱动力矩、矩角特性及动力学性能等科学问题,完善大间隙条件下磁力传动系统的设计方法,揭示系统空间磁场分布规律、系统主要参数对驱动力矩的影响规律,得到系统矩角特性,并将研究成果应用于永磁轴流式血泵驱动系统设计,以期实现大间隙条件下磁力传动技术的应用、推动微型轴流式血泵的临床化。上述研究成果对突破磁力传动技术应用受到传动系统磁极间隙限制的现状

具有意义。

1.2 血泵及其驱动技术研究现状

1.2.1 血泵的分类及发展

永磁轴流式血泵属于机械辅助循环 (mechanical circulatory sport, MCS), 是连接于心脏或植入心脏内, 承担部分或全部心功能的各类心脏辅助装置的统称^[3]。永磁轴流式血泵主要分为心室辅助装置 (ventricular assist device, VAD) 和全人工心脏 (total artificial heart, TAH) 两类, 通称为人工心脏。前者可以部分或完全替代单侧心室的循环功能, 即左心室辅助装置 (left ventricular assist device, LVAD) 和右心室辅助装置 (right ventricular assist device, RVAD)。机械辅助循环的目的是改善循环功能不全患者的循环状态^[4,5], 主要有以下几方面的作用:

(1) 维持全身组织的正常循环。

(2) 减轻心脏的前、后负荷及降低心肌的耗氧量。

(3) 提高舒张期血压, 增加冠状脉血流, 促进侧支循环的同时改善心肌的收缩能力。

(4) 促进心脏泵机能的强化及障碍心肌的恢复。

1.2.1.1 血泵的分类

按照血泵的工作原理分类, 血泵的类型分为容积式 (脉动式) 血泵和叶片式 (旋转式) 血泵; 按照辅助方式不同, 分为全人工心脏、心室辅助装置; 按照驱动方式不同, 分为气动血泵、电动血泵和磁驱动血泵; 按照植入位置分为体外式血泵和植入式血泵。

1. 容积式 (脉动式) 血泵

早期开发的全人工心脏和辅助循环装置, 主要目的是模拟自然心脏, 血泵的主要类型是容积式血泵。容积式血泵是由一个血袋、控制血流方向的瓣及动力部分组成。单向瓣允许血液从进口端流入, 从出口端流出。当动力部分挤压血袋时, 血袋的容积减少, 从而把血液挤压出去, 类似于心脏的收缩过程; 当血袋的压

力减少时,外部的血液就会流入血袋,类似于心脏的舒张过程。

总之,容积式血泵的缺点是体积大,不易植入;由于有庞大的附属机构,要有管道和导线穿过皮肤才能内、外连通,故易感染;瓣和膜是这类血泵的关键部件,它们易损坏,而且是血栓易形成的部位;另外,由于血泵部件与流经血泵的血液之间接触面积大,造成溶血也比较严重。其优点是这类血泵的工作原理与自然心脏的工作机制类似,都是搏动的,与受体的生理机制相适应,有利于各主要脏器的血液微循环灌注。

2. 叶片式(旋转式)血泵

由于容积式血泵存在上述缺点,严重制约其进一步广泛应用,于是人们开始研究体积小、可植入的叶片式血泵。叶片式血泵与容积式血泵相比,能够克服体积大而不便于植入的问题。但是,在血泵控制方面,叶片式血泵实现生理反馈控制比较困难^[6]。否则,叶片泵的应用也会因控制方面的问题带来一些不利的影响。

目前,研究较多的叶片式血泵主要包括离心式血泵和轴流式血泵。

1) 离心式血泵

离心式血泵是将叶片装在血泵的轴上,当轴高速旋转时,这些叶片将引导血液并将其抛至外沿,叶片对血液的动力作用将形成动脉压。压力的大小取决于叶轮的转速,一般情况下,转速越高所形成的动脉压也越高。属于这种类型的血泵有 Biomedicus (Minneapolis, MN) 离心泵、Delphin 离心泵、Sarns 离心泵等^[7-9]。Biomedicus (Minneapolis, MN) 离心泵、Sarns 离心泵已应用于临床,其他血泵的临床应用还在研究中。值得一提的是,Nojiri 等^[10]研制的微型悬浮式磁力耦合离心泵,叶片靠磁力悬浮在泵内,无须支撑,从而解决了密封问题,减少了血栓的发生。

由于离心泵工作时,叶片要高速旋转,由此对红细胞所引起的机械破坏引起了人们的重视,Schima 等^[11]报道了离心泵对红

细胞所引起的机械破坏与红细胞的弹性无关。

2) 轴流式血泵

轴流式血泵的叶片也是装在血泵旋转轴上,当血泵旋转轴旋转时,血液沿着倾斜的方向抛出(沿螺旋线方向运动),经过导叶导流后,血液基本上是沿着血泵的轴向运动,故称为轴流式血泵。轴流式血泵与离心式血泵相比,能提供较大的流量。比较有代表性的轴流式血泵有 Hemopump 泵、Nimbus Axipump 泵、Jarvik2000 轴流泵。目前用于临床的只有 Hemopump 泵,其他的还处在研究阶段。

轴流式血泵的最大优点是体积小、流量大、效率高,如 Hemopump^[12] 泵的直径仅为 7 mm,其转速可达到 25000 rpm,流量可达到 4.5 L/min。通过周围动脉(股动脉)沿主动脉植入左心室,将左心室的血液泵入主动脉。德州心脏研究所研制的 Jarvik2000 微型轴流泵^[13],Baylor 大学和美国国家宇航局联合研制的 Baylor/NASA 微型轴流泵均处于动物实验阶段^[14]。德国 Burgreen 等^[15]设计了一种轴流式血泵,并对叶轮进行了优化设计,减少了血液同异物的接触面积,设计了 5 种精巧叶片、3 种精致磁间隔流路,以及 6 种精巧的尾定子。

李国荣等^[16,17]提出动力性主动脉瓣,即在主动脉瓣的位置植入能够旋转的叶轮(其功能类似于轴流泵的叶轮),通过叶轮的旋转产生与传统机械瓣膜相同的效果,而且具有泵的作用,也属于轴流式血泵。

3) 其他类型血泵

除了上述容积式血泵和叶片式血泵外,还有其他类型的血泵,如 Takeshi 等^[18]报道了由生物人工心室组成的循环辅助装置。该人工心室由骨骼肌组成,其上排列着生物人工心脏内膜。其优点是血栓较少;但若作为长期使用,血栓形成仍是一个大问题。Monties 等^[19]研制的血泵,其工作原理类似于推板式血泵,内有一个椭圆形的转子,转子与定子之间只有一个接触点,是一个没有瓣膜、低转速、半搏动流的旋转泵。

1.2.1.2 血泵的发展

1. 各类血泵的技术特点

1) 气动泵

Abiomed BVS5000 为气动式搏动性心室辅助装置 (VAD), 由美国 ABIOMED 公司研制生产, 是第一个被美国食品药品监督管理局 (FDA) 批准用于治疗心脏外科术后心力衰竭 (心衰) 的心室辅助装置 (VAD)。其特点是: ①每搏输出量为 70 ~ 80 mL, 最大流量为 6 L/min; ②要求患者体表面积 (BAS) 大于 1.3 m²; ③输出量随前、后负荷的变化而变化; ④重力引流无真空吸引; ⑤需要用肝素抗凝; ⑥一般辅助时间为 7 ~ 10 d。Abiomed AB5000 是该公司近年研制的更新一代气动式搏动性心室辅助装置 (VAD), 其外观大小和原理类似 Thoratec 心室辅助装置 (VAD)。

Berlin Heart Excor 是一种便携式气动式搏动性心室辅助装置 (VAD)。血泵由聚氨酯制成, 其光滑的触血面经过肝素涂层处理。流入与流出部分有倾碟式瓣膜起单向阀门作用。泵的容量范围为 12 ~ 80 mL, 故可用于大多数病人。现主要在欧洲国家使用, 主要用于心脏移植过渡的病人, 目前也用于心肌恢复的治疗, 迄今临床应用逾 650 例。

Thoratec 心室辅助装置 (VAD) 是目前美国食品药品监督管理局 (FDA) 唯一批准既用于心脏移植过渡又用于心肌恢复的中效搏动性心室辅助装置 (VAD), 1996 年正式用于临床。其最具特色的是血 (泵) 囊内衬光滑无瑕, 由一种特殊的材料制成, 表现出与血液相容性好、血栓生成率低、耐用性持久、性能稳定等优越性。Thoratec I 心室辅助装置 (VAD) 是 Thoratec 公司在全世界 2800 例非植入式 Thoratec 心室辅助装置 (VAD) 应用的基础上设计而成。体积小, 外表非常光滑, 由先进的钛合金构成。它是当前美国食品药品监督管理局 (FDA) 唯一批准的既可用于左心也可用于右心或全心辅助的可植入式心室辅助装置 (VAD), 迄今已对 2000 余例患者进行了左室或右室或双室辅助^[20]。

Heart Mate 是迄今全世界应用最多的植入式心室辅助装置 (VAD) (约 4500 例), 属于推板式血泵, 根据气动和电动不同驱动方式, 分为气动泵 (IP) 和电动泵 (VE)。主要包括血泵、控制系统和电源 3 个部分。血泵质量约 570 g, 大小约 11 cm × 4 cm, 每搏输出量达 80 mL, 外壳由钛合金制成, 内部有一推动膜片将其分成独立的两个腔——血腔和驱动腔, 二者互不相通。

Novacor LVAS^[21,22] 是 World Heart 公司开发的脉动流植入式血泵。在 1984 年首次成功完成心脏移植过渡手术, 现在产品有脉动式和旋转式两种类型的血泵。最初的驱动控制台重 150 kg, 1993 年改为便携式控制器, 可以与充电电池一起拴在腰部^[23]。Novacor 血泵获得美国食品药品监督管理局 (FDA) 批准用于心脏移植过渡 (bridge to trans plant, BTP)。该公司研制的新一代产品是无顺应室的全植入心室辅助装置 (VAD), 以及磁悬浮旋转式血泵 Heart Quet TM。由电磁铁的通/断控制血泵的输出, 电磁铁直接作用在弹力臂上, 在弹力臂的作用下推动血囊的收缩和舒张, 完成与自然心脏工作类似的泵血功能。其最大搏出量为 70 mL, 最大流量为 10 L/min。血泵工作与 ECG (Electrocardiograph) 同步, 血液的流动是脉动流。

2) 电动泵

T-PLS 心肺辅助装置是一种双腔式搏动性血液机械辅助循环装置, 由韩国 NEWHEART-BIO 公司生产。其每搏输出量为 70 mL, 最大流量为 7 L/min, 适用于心肺手术或应急状况下心肺复苏等机械辅助治疗。

Novacor 心室辅助装置 (VAD) 是一种电磁驱动型血泵, 既可用于心脏移植过渡期的支持治疗, 也可用于长期 (目的) 性支持治疗。在全世界近 100 个心脏中心的约 1500 例应用患者中, 有 10% 的辅助时间超过 1 年, 最长辅助时间达 6 年。其外形较大, 约 16 cm × 13 cm × 6.5 cm。与 Heart Mate 类似, 植入部位为腹部, 要求体表面积大于 1.5 m², 并只用于左心辅助。

Abiocor TAH 是最新的电动式全人工心脏装置, 由美国

ABIOMED 公司研制, 2006 年 9 月成为第一个被美国食品药品监督管理局 (FDA) 批准应用于临床的全人工心脏, 为全植入式, 临床研究表明该装置对于终末期心衰患者是安全有效的。迄今为止已在 10 余例病人中应用, 最长支持 14 个月, 2 例康复出院, 而影响生存率的主要原因是血栓和多脏器衰竭^[24]。

3) 离心泵

Bio Medicus 离心泵具有体积小, 无瓣膜, 控制简单, 靠调节转速就可以控制流量等优点。其缺点是功率低, 血栓形成率较高。1978 年开始用于临床。30 年来几经换代与改良, 已主要用于心脏及大血管手术中全心肺转流或左心转流。尽管在治疗急性心源性休克方面起了一定作用, 但总的效果一直不尽如人意。因此, 用其进行左心辅助治疗的病例越来越少, 相对用于体外膜肺氧合治疗 (ECMO) 的病例多一些。

Levitronix Centri Mag 装置是一种专门用于心室辅助的新型离心泵。因无轴承、无挠曲的血囊、无瓣膜等构件, 与其他离心泵比较, 不仅对血液的破坏性较小, 而且安全性更大。目前最长支持时间为 14 d。截至 2005 年 6 月, 欧洲应用 92 例, 其中左心辅助占 30%, 双心辅助占 21%, 右心辅助占 11%, 30d 存活率为 45%。

NEDO PI 心室辅助装置 (VAD) 是最新研制的可用于左、右心及双心辅助的系列离心泵, 它是一种液压悬浮驱动的离心泵, 目前 NEDO PI2710 泵具有优良的生物相容性、抗血栓性及低的出血率, 已通过动物生存 2 年实验, 正进行临床实验^[25]。

4) 轴流泵

Jarvik 2000 心室辅助装置 (VAD) 是血泵直接插入心尖的微型心室辅助装置 (VAD)。血泵仅 2.5 cm × 5.5 cm 大小, 质量为 90 g, 外壳为钛合金, 转速为 8000 ~ 15000 rpm, 流量为 3 ~ 7 L/min。小儿型血泵仅为成人的 1/5 大小, 质量为 18 g, 容量为 5 mL。与其他心室辅助装置 (VAD) 不同的是血泵直接插入心尖, 其插入部分有一个硅化的多聚酯缝合圈用于固定泵与心脏。

血泵连接于心尖和主动脉。便携式电池可在每次充电后用 8 ~ 10 h。2000 年初经美国食品药品监督管理局 (FDA) 批准进行临床试验, 目前已在全球心脏中心临床应用 300 余例, 其中 70% 用于心脏移植的过渡^[26]。

Berlin Heart Incor 为磁悬浮轴流泵, 轴叶轮不与其他部分接触, 无摩擦热, 耗能量少, 机械效率高 ($> 90\%$), 转速高达 12000 rpm, 流量可为 7 L/min。血泵质量约 200 g, 直径约 3 cm。既可用于心脏移植前的过渡期治疗, 也可用于心肌功能恢复治疗, 现正在欧洲和中国进行临床试用^[27]。

Impella pump 是当前最小的轴流泵。轴叶轮直径只有 6.4 mm, 流量可达 5 ~ 6 L/min, 只有一根直径为 3 mm 的导线与泵相连。其驱动装置大约 30 cm × 30 cm, 重约 3 kg, 移动和携带方便。用于左心辅助的 Impella pump, 通过主动脉瓣插入左心室完成泵血功能, 最长可以辅助 7 d; 用于右心辅助的 Impella pump, 直接插入右心房并通过一段 PTFE 人工管道 (8 mm) 与肺动脉连接, Impella pump 也可以通过经皮股动脉穿刺完成左心辅助功能, 现主要在欧洲应用^[28]。

TCI Heart Mate 血泵为高速轴流泵, 质量大约为 176 g, 直径为 4 cm, 流量可达 10 L/min, 转速可达 13000 rpm, 并可自动调节。其形状、静音、连接方式及工作方式与 DeBakey 心室辅助装置 (VAD) 较相似。设计目标用于长期目的性治疗。2000 年 7 月首先在以色列开展临床实验, 现在欧美进行临床试用。

DeBakey 心室辅助装置 (VAD) 是 MicroMed 公司的产品, 属于轴流式辅助装置, 1996 年该公司收到 NASA (美国国家航空和宇宙航行局) 的关于 DeBakey 旋转血泵用于心脏循环装置的特许证。DeBakey 心室辅助装置 (VAD) 1998 年在欧洲开始临床实验^[29], 2000 年在美国开始用于临床植入^[30]。血泵由叶轮 (诱导器)、电机定子、壳体、整流器和扩散器等部分组成。电机定子通电, 叶轮内置有永磁体, 在电磁场作用下, 使叶轮 (包括整流器和扩散器) 旋转, 利用磁悬浮原理实现转子的支

撑。儿童用心室辅助装置 (VAD) 的质量小于 94 g, 叶轮转速为 7500 ~ 25000 rpm, 最大流量为 10 L/min^[31]。

5) 新一代悬浮式心室辅助装置 (VAD)

VentrAssist LVAS 采用水力悬浮的叶轮, 因此对血液损害极小, 生物组织相容性很好, 血泵质量为 268 g, 直径为 6 cm。2003 年 6 月开始临床试用, 临床用途同 Berlin Heart Incor。

Heartmate 2 III 左心室辅助装置 (LVAD) 与 Heartmate 2 II 左心室辅助装置 (LVAD) 的主要区别是使用了磁悬浮泵体, 保持了充足直向的血流, 从而最大限度上减少了溶血和血栓的发生, 适用于成人和儿童, 并可终生植入, 目前正处于动物实验阶段。

T - ILVAS^[32,33] (Terumo Implantable Left Ventricular Assist System) 是由 Terumo 公司研制的磁悬浮结构的非脉动流血泵 (商业名称是 DuraHeart)。该血泵是一种长期植入式血泵, 第一、二代血泵已进行动物活体实验, 第三代的目标是叶轮在腔体内自由悬浮转动, 没有体接触, 以克服前两代产品存在的并发症高、术后感染和机械失效等方面的问题。血泵由 4 部分组成, 即磁悬浮轴承、叶轮、壳体和无刷直流电机。叶轮和旋转电机的磁力耦合作用推动叶轮旋转, 泵体内 3 块电磁铁利用磁悬浮原理来支撑叶轮。电磁铁的电流由 3 个位置传感器控制, 使叶轮轴线悬浮在壳体轴线上, 输出流量为 8 L/min, 质量为 400 g。

Heart Quest 心室辅助装置 (VAD) 是最新研制的磁悬浮式心室辅助装置 (VAD)^[34], 体积最小仅 35 mm × 75 mm, 质量仅 440 g, 经牛的动物实验结果满意, 未抗凝治疗观察 116 d 未见血栓的发生, 于 2006 年进入临床实验阶段。

2. 各类血泵的研究现状

国内外大量的研究和临床应用都已经证实, 严重心衰的病人施行人工心脏泵支持后心肌功能可以恢复, 长期的人工心脏泵支持可能使心肌从肉眼到组织解剖、生理以及细胞功能, 包括钙离子转运、糖原利用等方面得到明显的改善, 病人可能成功撤离人工心脏泵并长期存活, 称之为“心肌恢复的过渡支持”。如果病