# 燃料电池的空间应用技术发展

胡 晶<sup>1</sup>,李海滨<sup>1</sup>,顾海涛<sup>2</sup>

(1.上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院,上海200240;2.上海空间电源研究所 空间电源技术国家重点实验室,上海200245)

摘 要: 燃料电池作为高效环保的发电装置,在空间应用上具有极大潜力。本文论述了近年燃料电池的空间 应用技术,以求促进相关产业及研究的进一步发展。分别对微重力环境下的水、热管理技术进行了探讨,发现微重 力中气流方向及燃料电池布置对电池性能具有显著影响,气流宜以相反方向通入,微重力环境对竖直放置和水平 放置(阳极在上或阴极在上)的燃料电池性能影响不一,其中水平放置(阴极在上)和竖直放置的工况下促进了水的 顺利排出。进而比较了3种常见散热方式在空间应用上的优缺点,并且对热管冷却的材料选择给出了建议。最后 简要介绍了目前在航天应用上受到关注的可再生燃料电池。

关键词:燃料电池;空间;微重力;水管理;可再生燃料电池
 中图分类号:TM 911.4 文献标志码:A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2021.01.012

#### **Development of Space Applied Technology for Fuel Cells**

HU Jing<sup>1</sup>, LI Haibin<sup>1</sup>, GU Haitao<sup>2</sup>

(1.School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2.State Key Laboratory of Space Power-Sources Technology, Shanghai Institute of Space Power-Sources, Shanghai 20045, China)

**Abstract:** As an efficient and environmental-friendly power generation device, fuel cell exhibits great potential for space applications. This paper summarizes and discusses space applied technologies of fuel cells in recent years in order to promote further development of related industries and research. Water and heat management technologies in the micro-gravity environment are discussed separately. It is found that the direction of the flow in microgravity and arrangements of fuel cell have significant effect on its performance. The flow should be supplied from the opposite direction. The micro-gravity environment has different effects on the performance of fuel cells with vertical placement, horizontal placement (anode on top/cathode on top). Among these conditions, drainage of water is promoted in horizontal placement (cathode on top) and vertical placement (much water produced). Furthermore, the advantages and disadvantages of three common heat dissipation methods in space applications are compared, and suggestions about material selection of heat pipe cooling are given. Finally, a brief introduction of renewable fuel cells is given as it is currently receiving great attention in aerospace applications.

Key words: fuel cell; space; micro-gravity; water management; regenerative fuel cell

0 引言

目前,环境和能源问题正迫使航天器不断减少 排放及降低能耗。然而,针对发动机燃烧过程的改 进难以从根本上解决以上问题。作为一种清洁又 高效的推进技术,电力推进取代气压及液压推动能够提升系统的灵活性、操作性及效率。但随着深空 探测任务难度增大,航天器对电源系统的要求越来 越苛刻<sup>[1]</sup>。航天发射成本很高,而传统发电机的体

收稿日期:2019-11-14;修回日期:2019-12-17

基金项目:上海航天科技创新基金(SAST2017-133)

作者简介:胡 晶(1998-),男,硕士研究生,主要研究方向为燃料电池与质子交换膜。

通信作者:李海滨(1967-),男,博士,主要研究方向为燃料电池与质子交换膜。

积及质量较大,难以满足航天器的高能量及高功率 需求<sup>[2]</sup>。另一方面,燃料电池拥有高比能量,能量密 度达到 300~1 000 Wh/kg,可降低航天器的质量。 同时其不需经过卡诺循环,直接将化学能转化为电 能,拥有更高的效率。2012年8月,美国能源部部长 曾在在 Nature 上撰文指出,燃料电池将是航天备用 电源领域颇具潜力的应用方向<sup>[3]</sup>。

燃料电池的反应过程可看作电解水的逆过程, 氢气和氧气分别通向阴极及阳极,在催化剂的作用 下发生电化学反应,电子实现由阳极向阴极的迁 移,产生电流,同时生成水,并释放一定热量。

目前,航天领域应用较多的燃料电池有碱性燃料电池(AFC)以及质子交换膜燃料电池(PEMFC), 其中,AFC主要作为航天飞机的主电源,而PEMFC 既可作为主电源,也可作为可再生燃料电池(RFC) 的组成部分<sup>[4]</sup>。PEMFC可在低温快速启动,且电池 结构紧密,因不使用腐蚀性液态电解质,电池可在 任何方位、任何角度运行<sup>[5]</sup>,适宜于航天领域应用。

路易斯研究中心于1979—1987年联合约翰逊 航天中心,研制了针对空间站应用的碱性燃料电 池,其效率高于55%。并且其于1987年开展了针对 中高轨运行的燃料电池研究。美国汉密尔顿标准 公司也已经成功研制25 kW和35 kW燃料电池系 统,并在空间站和空间飞行器中投入使用。

欧洲航天局(ESA)和日本航天局(JAXA)也十 分重视燃料电池的发展。ESA制作的燃料电池系统,系统工作设定在200 mA/cm<sup>2</sup>、35 V,每周期工作 10 min。系统连续工作超过1 100 周次,等同于工作 寿命10 a以上<sup>[6]</sup>。

## 1 燃料电池的空间应用

20世纪60年代,燃料电池在航空航天领域中得 到应用,并因此得到广泛研究及快速发展。1965 年,聚苯磺酸膜燃料电池(早期的PEMFC)作为主 电源应用于双子星座五号载人飞船中,但在飞行过 程中,质子交换膜发生了降解,影响了燃料电池的 寿命及性能,同时导致产生的水无法供给航天员饮 用。之后,氢氧碱性燃料电池作为主电源用于阿波 罗(Apollo)登月飞船上,为人类首次登月作出贡献。 以上两种应用于航天器的燃料电池性能见表1。

|       | 表1     | 应用于美国航天器的燃料电池性能指标                                     |
|-------|--------|---|
| Fab.1 | Charac | teristics of fuel cells applied in American spacecraf |

| 燃料电池性能                      | "双子星座"载人飞船       | "阿波罗"登月飞船        |
|-----------------------------|------------------|------------------|
| 外形                          |                  |                  |
| 类型                          | 质子交换膜燃料电池        | 碱性燃料电池           |
| 配置                          | 3组电池模块,每组96节单体串联 | 3组电池模块,每组31节单体串联 |
| 任务时间/h                      | 360              | 400              |
| 比功率/(W•kg <sup>-1</sup> )   | 30.0             | 13.5             |
| 比能量/(kWh•kg <sup>-1</sup> ) | 0.40             | 0.40             |
| 最大输出功率/kW                   | 1.000            | 2.295            |
| 工作温度/℃                      | 21               | 204              |
| 总质量/kg                      | 30               | 100              |

此后,国际上便形成了AFC的研制高潮,而 PEMFC的研究则暂时搁置。直至近二三十年, PEMFC因其响应速度快、工作温度低等特性在地 面应用上展现出了巨大的潜力,而且性能及成本问 题也在逐步改善,从而再次引起了研究人员的关注。而AFC则因为应用相对局限于空间领域,且存 在着寿命较短(<5000h)、比功率低、体积大、维护 困难等缺陷<sup>[7]</sup>,技术发展受到了严重制约。 美国国家航空航天局(NASA)的相关研究,集中在可应用于月球基地电源系统、近空间飞行器动力系统的RFC(可再生燃料电池)及AFC的升级<sup>[7]</sup>。

# 2 PEMFC原理及结构

PEMFC在地面应用中表现出了良好性能及 较大潜力,在航天领域的应用正受到广泛的研究与 探讨。质子交换膜燃料电池主要由质子交换膜、催 化层以及扩散层组成,如图1所示。催化层与扩散 层的组合又称为电极。在扩散层之外配置有双极 板,以提供反应气体及冷却水的流场,不同形状及 结构的流场也会对燃料电池的性能产生显著的 影响。



质子交换膜起着分隔燃料和氧化剂的作用,同 时其由于自身的特殊结构而具备传导质子的能 力<sup>[8]</sup>。质子交换膜一般由全氟磺酸树脂构成,如图2 所示。质子(H<sup>+</sup>)在通过质子交换膜时首先附着在 磺酸基上,之后迁移到邻近的水分子,形成水合氢 离子,水合氢离子上的H<sup>+</sup>又附着到邻近的磺酸基 上,如此循环往复,从而借助于水分子为媒介,在阳 极产生的H<sup>+</sup>得以穿过质子交换膜到达阴极<sup>[9]</sup>,并完 成电化学反应。因此,为了使质子交换膜获得高质 子电导率,要求其工作于高湿度环境。



水管理的质量将直接影响电池性能。水积聚 过多,会造成水淹现象,气体无法通过气体扩散层 到达催化层,引起燃料电池的效率和最大输出功率 的降低,甚至导致燃料电池的失效;水分不足则会 引起质子交换膜失水,质子传导性能下降,甚至使 燃料电池失效。

燃料电池催化层上分布有催化剂,为电化学反应的进行提供场所。碳纸构成的气体扩散层,由于强度较高,对催化层起着支撑作用,其多孔结构可使反应气顺畅通过气体扩散层,到达催化层参加反应,而且气体扩散层还具有收集电流的作用。

PEMFC的工作原理如图 3 所示, H<sub>2</sub>通过燃料 入口进入, 在阳极失去电子, 电子通过外部电路, 流 经负载到达阴极, 而 H<sup>+</sup>则穿过质子交换膜到达阳 极, 与 O<sub>2</sub>反应生成水, 并放出热量。阳极、阴极发生 的反应及总反应如下:

阴极:
$$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^+ \rightarrow H_20$$
 (2)

在现实应用中,单个燃料电池的电压及功率都 非常有限,难以应用于具体需求中,工程中更多使 用的并非单电池,而是燃料电池的电堆。电堆结构 如图4所示,单电池通过重复地堆砌便形成了电堆, 通常为串联结构。

#### 3 空间燃料电池水管理

由于电渗作用,质子的迁移过程中常携带水分子,阳极因此常处于缺水状态,需要加湿器湿润反 应气体<sup>[10]</sup>。而阴极则因电化学反应生成水,需要排



出多余的水,此时燃料电池水管理显得十分必要。

空间应用的燃料电池处于微重力环境下,有特殊的系统需求、操作条件及相关设计。尤其在流场的设计及布置上,在微重力环境中,重力影响消失, 无论是流场中反应气体的浓度还是液态水的排出都发生了一些变化,燃料电池应用于空间场合之前,必须先考虑这些变化因素及其对电池性能与寿命的影响。

#### 3.1 被动排水技术

不同于地面应用中的燃料电池,空间应用的燃料电池因微重力环境中出现的复杂气-液两相流,使 气体吹扫效果不佳,此时流道进出口压差成为排水 的主要驱动力。若采用主动排水技术,将增加系统 功耗及复杂性,同时降低系统可靠性。被动排水技 术也因此成为空间应用燃料电池的研究热点,与主 动排水的不同点在于,采用该技术不需要运动部 件,仅依靠毛细力和膜分离技术实现微重力环境的 电池排水。

如图5所示,在阴极流场侧布有多孔亲水膜,水 和氧气混合物在通过阴极时,水便以水蒸气的形式 吸附在亲水膜上,而氧气则被亲水膜阻隔,完成水 与氧气的分离。水蒸气进入亲水膜的另一侧后,又 在冷却剂的作用下,冷凝成液态水,并顺利排出。



Fig.5 Schematic of membrane-based static water separation PEMFC

尽管目前空间燃料电池系统的水管理已经实 现了技术性突破,但是复杂的空间水管理仍需要更 多的实验与研究。

#### 3.2 气流方向对燃料电池的影响

燃料电池内气流方向的不同对水管理也会产 生一定影响,当纯氢与纯氧联用且从相反方向通入 燃料电池时,反应气体无需加湿,可通过反应生成 水实现自加湿<sup>[10]</sup>。如图6所示,氢气及氧气以相反 方向通过燃料电池,阴极侧电化学反应生成的水, 由氧气的高浓度端吹扫向低浓度端,且在此处聚 集,聚集的水通过质子交换膜给氢气的入口处加 湿,使得氢气高浓度端具有一定湿度,并进而将水 滴吹扫向氢气低浓度端。此时,氢气低浓度端又通 过质子交换膜给经过长时间吹扫已经干燥的氧气 入口加湿,水滴便依此在系统中实现循环。反之, 若使氢气、氧气从相同方向通过燃料电池且不加 湿,燃料电池则表现出较差性能<sup>[11]</sup>。



Fig.6 Water droplet movement mode when given reverse flow

#### 3.3 燃料电池的布置

不同的放置方式会引起燃料电池内水的排出 状况差异,对其工作性能也会产生显著影响。关于 燃料电池放置形式的研究可以从竖直放置、水平放 置(阳极在上)以及水平放置(阴极在上)3个方面 展开。

当燃料电池竖直放置时(如图7所示),对于系统产生水较多的工况,不同于常规环境下重力作用使液态水堆积在流道底部无法有效排出,聚集在流道内的水和反应气体会形成气-液两相流动,液态水在气相惯性力的推动下可顺利排出,气体扩散层暴露在反应气体中,增强反应气体的传质,提高了燃

料电池的工作性能<sup>[12]</sup>。由于大电流密度下对于气体传质的要求颇高,流道凝水的及时排除对大电流密度下燃料电池性能的提升作用比小电流密度下 更为明显。研究表明,此时燃料电池的性能(同电流密度下的电压)可以提高4.6%左右<sup>[13]</sup>。



Fig.7 Vertically placed structure diagram

而对于系统产生水不多的工况,水滴在被反应 气体吹扫的同时,也聚集成较大的液滴。液滴的直 径甚至达到了流道断面的直径,直径较大的液滴难 以被反应气体吹扫出流道,依附在流道的角落上并 且上下震动,阻碍了反应气体的顺利通过,燃料电 池的工作性能与重力条件下相比有所下降。研究 表明,此时燃料电池的性能将下降 6.6% 左右<sup>[13]</sup>。

当燃料电池水平放置时,存在两种情况:阳极 在上及阴极在上。若阳极在上(如图8所示),重力 会使凝聚的液滴落在光滑的双极板上,液态水移动 阻力小,也易于从流道中排出;若阴极在上(如图9 所示),重力会使凝聚的水分子落在多孔的气体扩 散层上,液滴移动阻力大,无法排出,形成水膜阻碍 气体运输使电池性能下降<sup>[14]</sup>。因此,在重力工况 下,阳极在上的工况燃料电池性能优于阴极在上的 工况。而对于微重力环境则不存在以上差异。但 是相比于微重力环境时垂直工况下的性能提升,在 水平放置工况下,由于产生的水难于排出,微重力 环境使燃料电池(阳极在上)的工作性能有所 下降<sup>[15]</sup>。



图8 重力作用下阳极在上的液滴分布情况







4 空间燃料电池热管理

燃料电池中电化学反应是放热过程,PEMFC 实际发电效率可达40%~60%,其余能量则以热能 形式释放。随着燃料电池运行时间增长,其温度也 逐渐上升。而温度过高则会使电堆内水平衡无法 维持,进而影响质子传导以及燃料电池的寿命。

若采用中压低温的方式储氢,对于小功率燃料 电池,低温反应气流便能够带走系统废热;但对于 输出功率在100 W以上的电堆,低温反应气流不足 以带走大量废热。此时需对燃料电池进行冷却,冷 却的方式主要可分为液体冷却、散热板冷却以及热 管冷却<sup>[16]</sup>。

其中,液体冷却主要用于大功率PEMFC电堆, 如图10所示,通过在相邻的双极板间循环输运高比 热容的液体冷却剂实现电堆的冷却,之后冷却剂又 通过总热控系统实现热量的释放。该系统使用循 环泵输运冷却剂,增加了辅助装置及较大数量的管 道,并且对系统的可靠性及寿命也会造成一定 影响。



采用散热板进行冷却则是将相邻双极板间替 换为散热板,散热板的边缘分别在对立两侧伸展到 双极板以外,燃料电池产生的热量通过传递到冷却 边缘,再与集成的外部热交换器换热,从而将废热 传递到冷却系统中<sup>[17]</sup>。该方式作为一种被动散热, 利用了航天器现有的热控系统,具有减小电堆质 量、体积及复杂度,增强系统可靠性等优点。

热管冷却同样适用于大功率电堆,其通过气-液 相变实现废热的吸收与排出,具有优良的热传递性 能、很好的温度一致性以及较远的热传导距离。有 研究者使用Cu和改良Ti制作热管,并用于未来空 间上使用的大功率电堆废热管理研究<sup>[18]</sup>。

### 5 可再生燃料电池

可再生燃料电池(RFC)是在普通氢氧燃料电 池(一般为PEMFC)基础上发展起来的产生、储存 和利用氢气/氧气的电化学装置,是将水电解技术 和氢氧燃料电池技术相结合的一种发电装置<sup>[19]</sup>。 一般利用太阳能实现水的电解制取氢气及氧气,气 体分离除湿后储存在储气罐中,在燃料电池工作时 向其供气,产生电能与水,如图11所示。燃料电池 产生的水则又作为氢气及氧气的来源之一参与电 解,实现物质和能量的循环利用。

RFC可以分为一体式、分开式及综合式<sup>[4]</sup>:一体式的特点是水的电解和发电均由相同组件完成;分



Fig.11 Frame diagram of RFC

开式由完全独立的两个组件分别完成水的电解和 发电;综合式则将两个组件放入同一单元内。

目前可再生燃料电池因其能量密度高、质量小 和效率高等特性,被广泛考虑用于载人飞船、国际 空间站、近地轨道卫星及高空长航时无人机等航空 航天领域。其能为航天器提供超过20kW的功率 输出和20d或更久的持续供电能力,比传统太阳能 电池-蓄电池体系拥有更优良的工作特性<sup>[20]</sup>。

可再生燃料电池具有的高比能量、高功率输出 和长供电持续时间等特点,使其在空间上具有巨大 潜力,现在也已成为燃料电池在空间应用的研究热 点之一,后续可在其系统集成优化设计及智能化自 主管理等方面进一步深入研究。

6 结束语

燃料电池的被动排水技术简化了水管理系统, 较好地实现流道内的水气分离,提高了系统水管理 的效率。系统产水较多时,竖直放置有利于微重力 环境的排水,可以使电池的性能提高4.6%;而产水 不多时,竖直放置不利于微重力下的排水,燃料电 池的性能将下降6.6%左右。而当燃料电池水平放 置时,若阴极在上,微重力会使水的排出更加通畅; 但若阳极在上,微重力则会使水的排出更加困难。

对于燃料电池在空间的热管理,液体冷却需增加辅助装置及较大数量的管道,使系统的稳定性及 寿命受到影响;散热板冷却可利用航天器现有的热 控系统,提高热管理的效率;而热管冷却则具有优 良的热传递能力及温度均匀性。可再生燃料电池 所具有的高比能量、高功率输出、长供电持续时间 等特点,使其在空间应用上具有巨大潜力。

#### 参考文献

- [1] 靳洋,刘世超,何小斌,等.空间核电源电力系统功率因数校正技术的研究[J].上海航天,2018,35(4): 114-119.
- [2] 吴峰,叶芳,郭航,等.燃料电池在航天中的应用[J].电 池,2007,37(3):238-240.
- [3] CHU S, MAJUMDAR A. Opportunities and challenges for a sustainable energy future [J]. Nature, 2012, 488(8):294-303.
- [4]刘建峰,谢文,马勇杰,等.空间燃料电池技术及其发展[J].机电产品开发与创新,2017,30(5):1-3.
- [5] 刘向,郭振波,张伟,等.质子交换膜燃料电池膜电极组 件性能分析[J].上海航天,2007,24(2):61-64.
- [6]张佳.基于快速原型的空间燃料电池控制方法研究 [D].廊坊:北华航天工业学院,2018.
- [7] 刘向,张伟,孙毅,等.空间燃料电池技术发展[J].中国 电子科学研究院学报,2012,7(5):472-476.
- [8] 衣宝廉.燃料电池:原理技术应用[M].北京:化学工业 出版社,2003:160-162.
- [9] WILSON M S, VALERIO J A, GOTTESFELD S. Low platinum loading electrodes for polymer electrolyte fuel cells fabricated using thermoplastic ionomers [J]. Polymer Electrolyte Fuel Cells, 1995, 40(3):355-363.
- [10] SONE Y, UENO M, NAITO H, et al. One kilowattclass fuel cell system for the aerospace applications in a micro-gravitational and closed environment [J]. Journal of Power Sources, 2006, 157(2):886-892.
- [11] SONE Y, UENO M, KUWAJIMA S, et al. Stable performance of a polymer electrolyte fuel cell system in a closed environment without external humidification[J]. Electrochemistry, 2006, 74(9):768-773.
- [12] 郭航,赵建福,叶芳,等.质子交换膜短时微重力性能实验研究[J].工程热物理学报,2009,30(8):1376-1378.
- [13] GUO H, LIU X, ZHAO F J, et al. Experimental study of two-phase flow in a proton exchange membrane fuel cell in short-term microgravity condition [J]. Applied Energy, 2014, 136(12):509 - 518.
- [14] CHEN S Z, WU Y H. Gravity effect on water discharged in PEM fuel cell cathode [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(7):2888-2893.
- [15] GUO Q, YE F, GUO H, et al. Gas/water and heat management of PEM-based fuel cell and electrolyzer systems for space applications [J]. Microgravity Sci Technol, 2017, 29(1/2):49 - 63.
- [16] GUO H, LIU X, ZHAO J F, et al. Effect of low

gravity on water removal inside proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) with different flow channel configurations [J]. Energy, 2016, 112(10): 926-934.

- [17] 谢文,刘建峰,马勇杰,等.适用于空间环境的质子交换 膜燃料电池热管理技术研究[J].机电产品开发与创 新,2017,30(5):9-11.
- [18] BURKE K A, JAKUPCA I, COLOZZA A, et al. Develpment of passive fuel cell thermal management

(上接第44页)

- [3] WANG Y, ZHANG Z, XUE X, et al. Experimental investigation on enhanced mechanical and damping performance of corrugated structure with metal rubber [J]. Thin-Walled Structures, 2020, 154:106816.
- [4]周颖,李锐,吕西林.黏弹性阻尼器性能试验研究及参数识别[J].结构工程师,2013,29(1):83-91.
- [5] 黄兴淮,张一,李奉南,等.黏弹性装配式减震器的性能 试验研究[J].天津大学学报(自然科学与工程技术 版),2020,53(4):405-410.
- [6]李尚帅,谭晶,张金云,等.轮胎硫化异步胀缩内模具的设计[J].北京化工大学学报(自然科学版),2019,46
  (2):72-76.
- [7] 周云,吴从晓,邓雪松.铅黏弹性阻尼器的开发、研究与应用[J].工程力学,2009,26(增刊2):80-90.
- [8] HEJAZI F, ZABIHI A, JAAFAR M S. Development of elasto-plastic viscous damper finite element model for reinforced concrete frames [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 65:284-293.
- [9] 袁健铮,李健. 黏弹性阻尼器在结构设计和抗震加固中的应用[J]. 广东土木与建筑, 2009, 16(6): 52-54.

technology [C]// AIAA 7th International Energy Conversion Engineering Conference. Denver: IECEC, 2009:1-14.

- [19] 宋世栋,张华民,马霄平,等.一体式可再生燃料电池 [J].化学进展,2006,18(10):1375-1380.
- [20] 陈宋,孙凤焕,张明,等.可再生燃料电池系统在空间电源中的应用研究[J]. 航天器工程,2014,23(6): 128-134.
- [10] 王烨华,周云,丁鲲.黏弹性阻尼减震结构研究与应用的新进展[J].防灾减灾工程学报,2006(1):109-121.
- [11] PAWLAK Z, LEWANDOWSKI R. The continuation method for the eigenvalue problem of structures with viscoelastic dampers [J]. Computers and Structures, 2013, 125:53-61.
- [12] LEWANDOWSKI R, LASECKA P M. Design sensitivity analysis of structures with viscoelastic dampers [J]. Computers and Structures, 2016, 164: 95-107.
- [13] 廖亚新.不同基体材料黏弹性阻尼器的试验研究[D]. 南京:东南大学,2015.
- [14] 胡嘉鑫,薛牧遥,杨敬贤,等.基于变刚度变阻尼的柔性 喷管动态模型[J].上海航天,2020,37(1):93-100.
- [15] 张美艳,邹怀武,王和庆,等.基于输入整形方法的2自 由度机械臂运行过程振动抑制[J].上海航天,2020,37 (5):37-42.
- [16] 余海东,来新民,林忠钦.航天大型薄壁结构装配制造
  尺寸精度预测与控制方法[J].上海航天,2020,37(3):
  1-10.