



太阳能飞行器发展与技术特性初探

演讲人：孙康文

2017.11.8



■ 提 纲

- 太阳能飞行器的应用优势
- 太阳能飞行器的典型分类
- 太阳能飞行器的发展历史
- 太阳能飞行器发展中的关键问题
- 太阳能飞行器设计的技术特征
- 太阳能飞行器设计的发展趋势

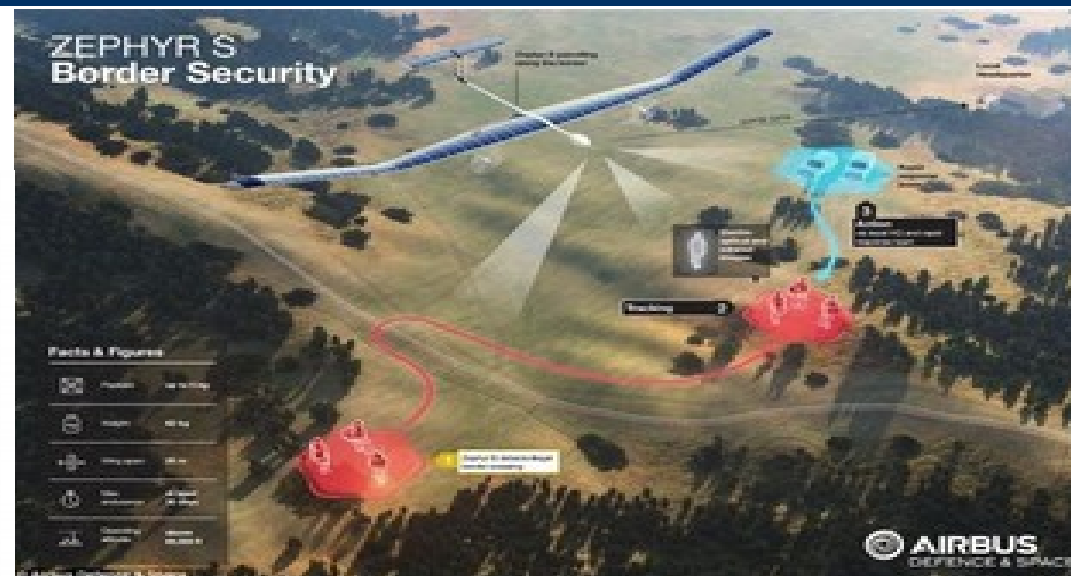
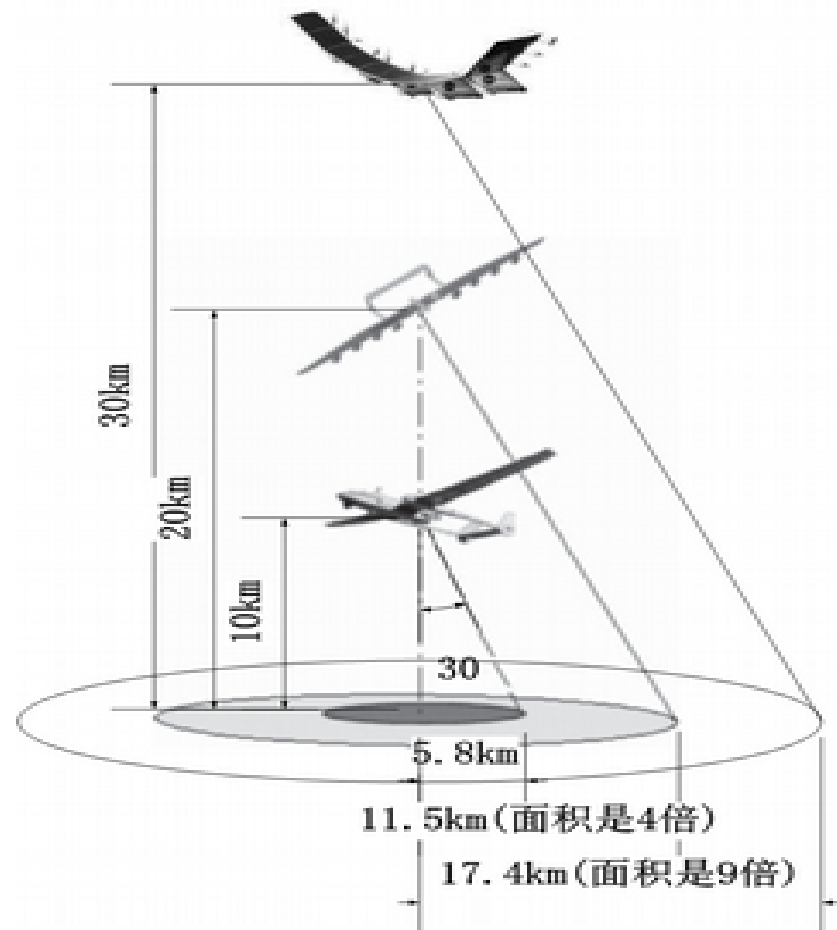


- 对环境无污染;
- 可实现长航时的留空飞行;
- 高空太阳能飞行器还具有: 飞行高度高、覆盖区域广, 可以执行多种任务等优点。
 - 1) 和传统飞机相比, 可避免传统飞机航时增加时引起的起飞重量的增加和效率的降低;
 - 2) 和卫星相比, 发射费用低, 技术风险较小, 可以改变飞行路线, 使用灵活。

就民用应用而言, 可有效拓宽电视服务、大气环境监测与天气预报、灾害预报与应急处理作用手段及可覆盖区域, 应用前景广阔。



➤ 典型应用



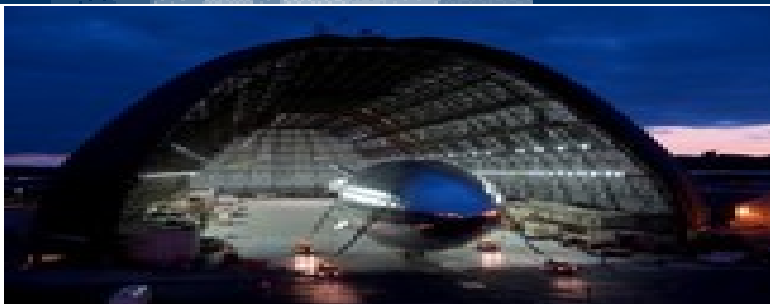
太阳能飞机的应用



平流层飞艇的应用



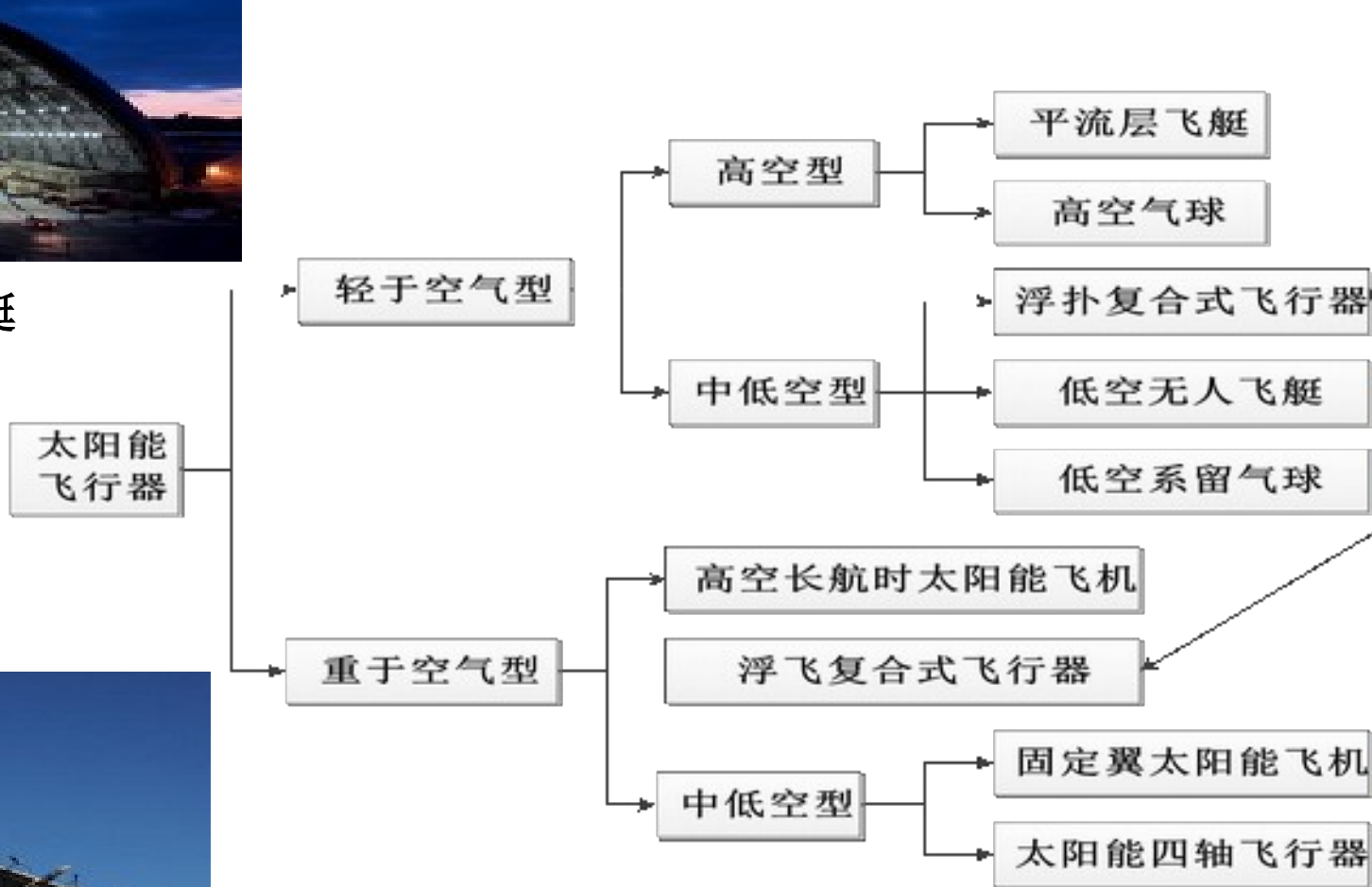
太阳能飞行器的典型分类



HALE-D 低空验证艇

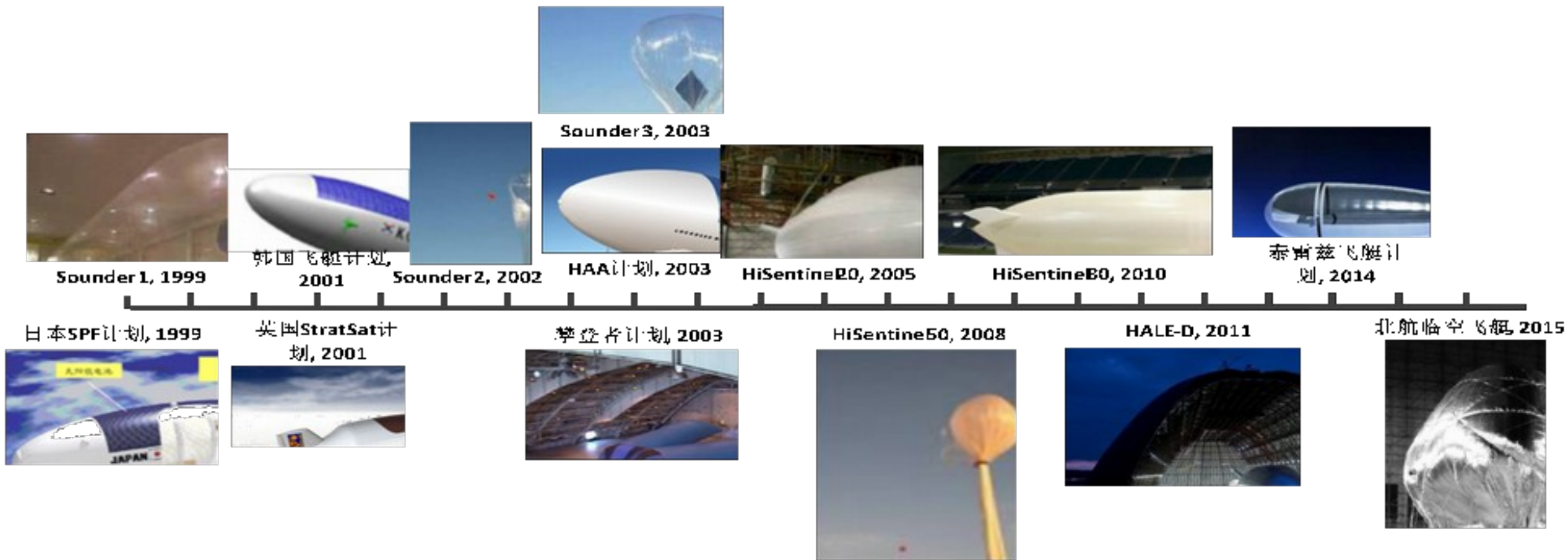


“彩虹” T 型太阳能无人机





平流层飞艇整体发展图





• 太阳能飞机整体发展图(共发展了 **100** 多种型号)





- 典型机型

- **Helios** 系列太阳能无人机：（美国）

1983 年



“探路者”号

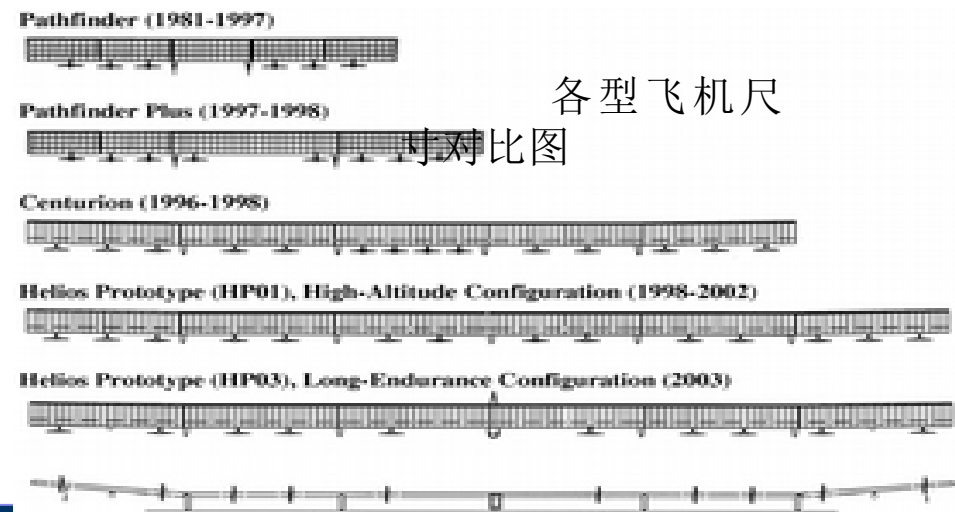
2003 年



“太阳神”号



“百夫长”号





• 典型机型

▪ Helios 系列太阳能无人机：（美国）

	Pathfinder (探路者)	Pathfinder- Plus	Centurion (百夫长)	Helios HP01 (太阳神)	Helios HP03
机长 (m)	3.6	3.6	3.6	3.6	5.0
翼展 (m)	29.5	36.3	61.8	75.3	
弦长 (m)	2.4				
展弦比	12:1	15:1	26:1	30.9:1	
空速 (km/h)	24 ~ 40		27-33	30.6 ~ 43.5	?
最大高度 (m)	21,802	24,445	-	29,523	19,812
最大重量 (kg)	252	315	628.2	929	1,052
载重 (kg)	45	67.5	45 ~ 270	329	-
电机数量 (1.5kW/ 个)	6	8	14	14	10
太阳能功率 (kW)	7.5	12.5	31	-	18.5
能源	电池	电池	电池	锂电池	锂电池 / 燃料电池
飞行高度 (km)	15.4	24.4	-	29.5	-(故障解体)
设计续航能力	12	-	-	2 个星期 ~ 6 个月	



- 典型机型

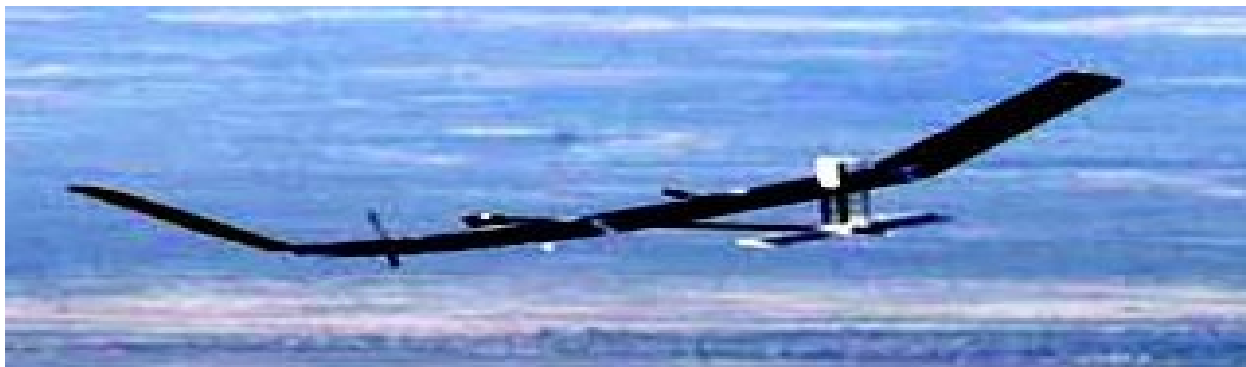
- **Zephyr** 系列太阳能无人机：（英国）

2001 年

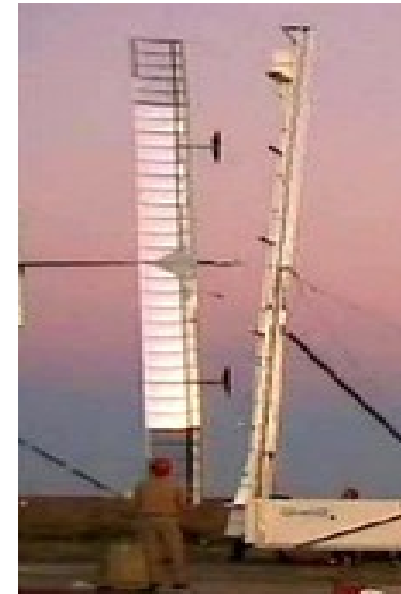


Zephyr 2

2008 年



Zephyr 6



Zephyr 4

2010 年



Zephyr 7



- 典型机型
 - Zephyr** 系列太阳能无人机：（英国）

年代	机型	主要成绩		备注
2001	Zephyr 2	概念验证机（总重 7kg）		
2002	Zephyr 3	概念验证机		拟通过气球携带，达到 40km 高度，但由于气球的技
2005	Performance and Specification			并高度所需的最
			31kg ， 5-2 携	
2006		Description	Next generation of the world record setting Zephyr providing greater operational flexibility	Advanced power system to improved endurance and allow year round routine operations. Enlarged platform with increased payload capability
2007		Wingspan	25 m	> 32 m
		Weight	62 - 65 kg	145 kg
		Availability	2017/2018	From 2020
2008	Example payload capabilities	3 - 5 kg HD Optical / IR Video NIIRS 6 imagery AIS Narrowband mobile comms (e.g. Tetra) 100 Mbps broadcast	15 - 20 kg (distributed) NIIRS 8 imagery RADAR LIDAR ESM/ELINT Broadband Comms	
2010.7	Flight Clearance	Military and civil flight approved	Certified for routine flight operations	改善设计



典型的高空气球计划

- 谷歌气球计划：**Project Loon** 是谷歌于 **2013** 年推出的一项计划，该计划试图通过气球为那些世界上最偏远的地区覆盖网络。目前谷歌再次对 **Project Loon** 进行了测试，并为那些关心这个项目的人们新增了 **24** 小时的实时追踪功能。





国外发展

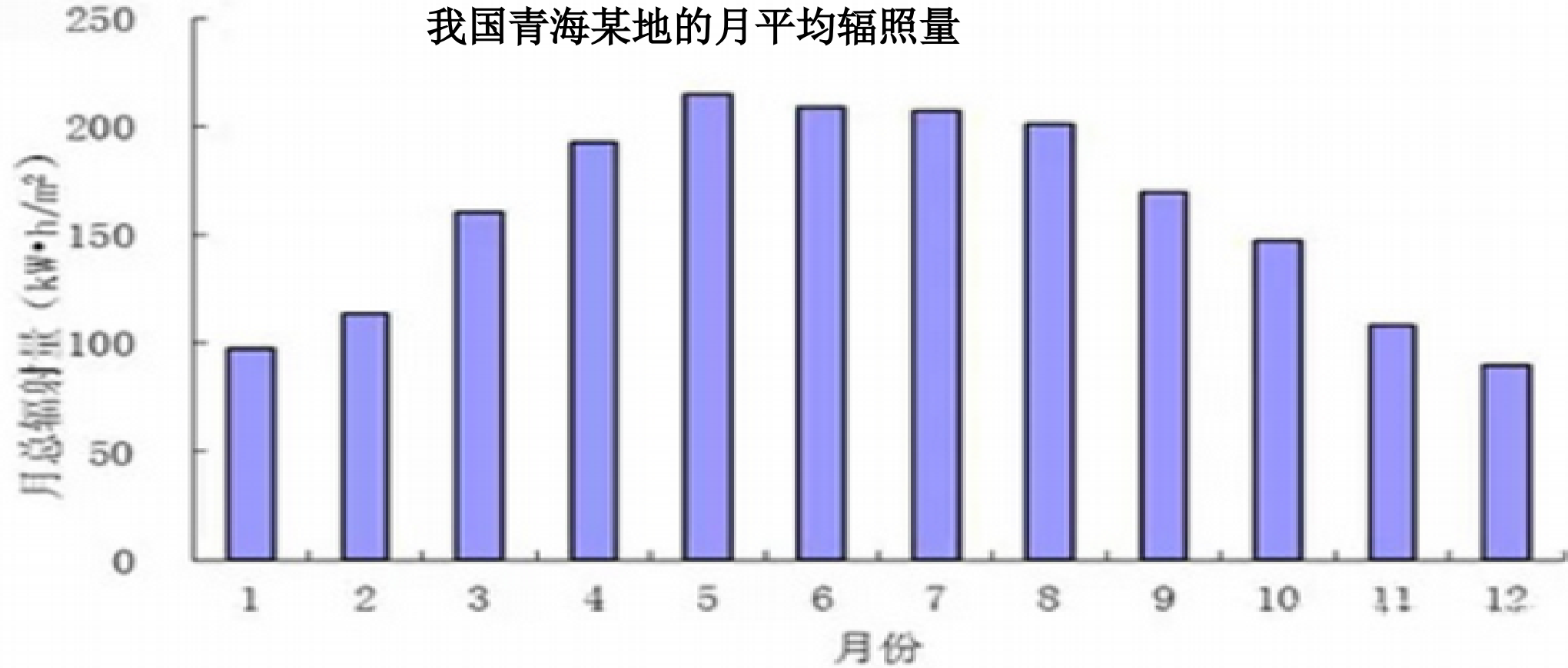


利用大批量气球，在距离地面 **20km** 的高空从东到西均匀分布

解决当前全球大约仍有三分之二的人无法接入互联网的情况

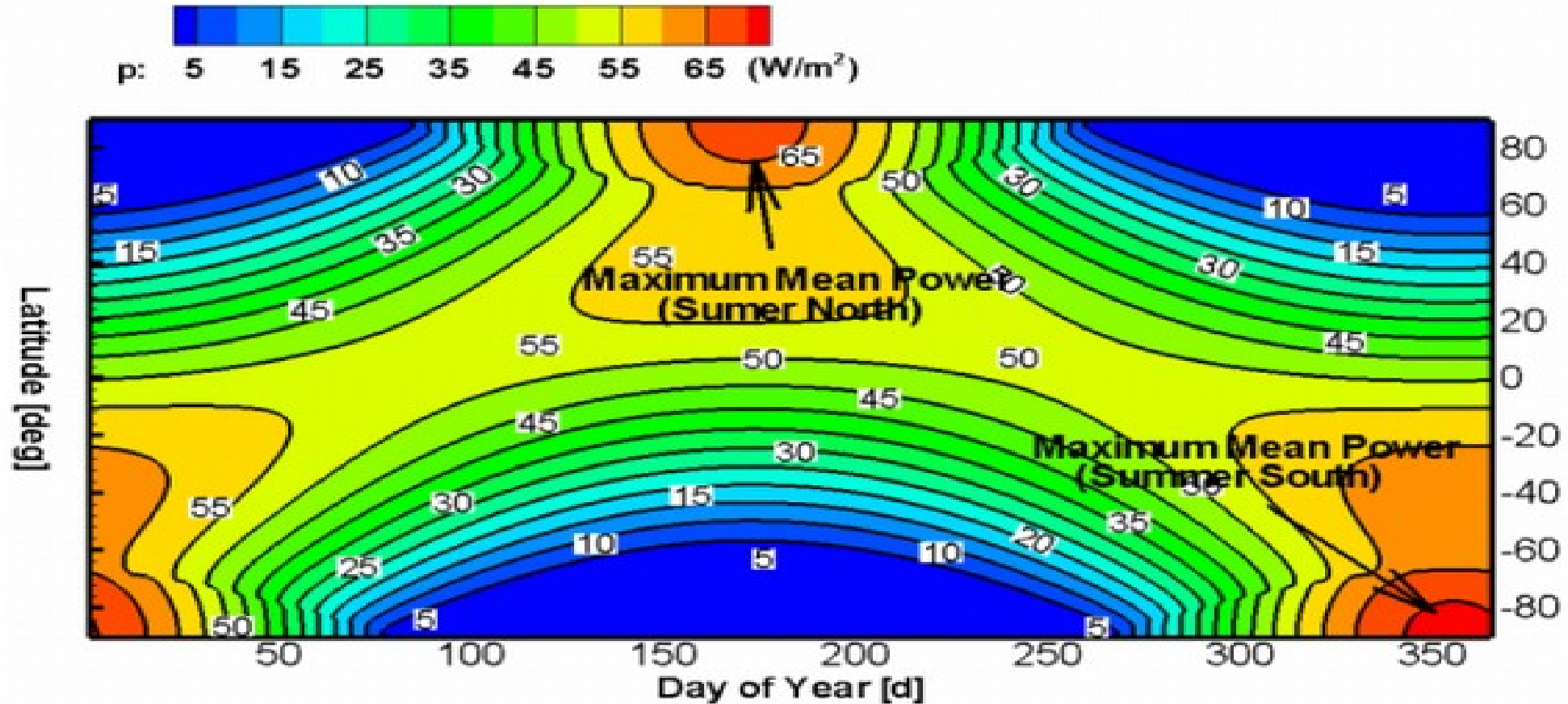


- 太阳辐照的季节性变化



<http://www.solarpwr.cn/bencandy.php?fid=61&id=21341>

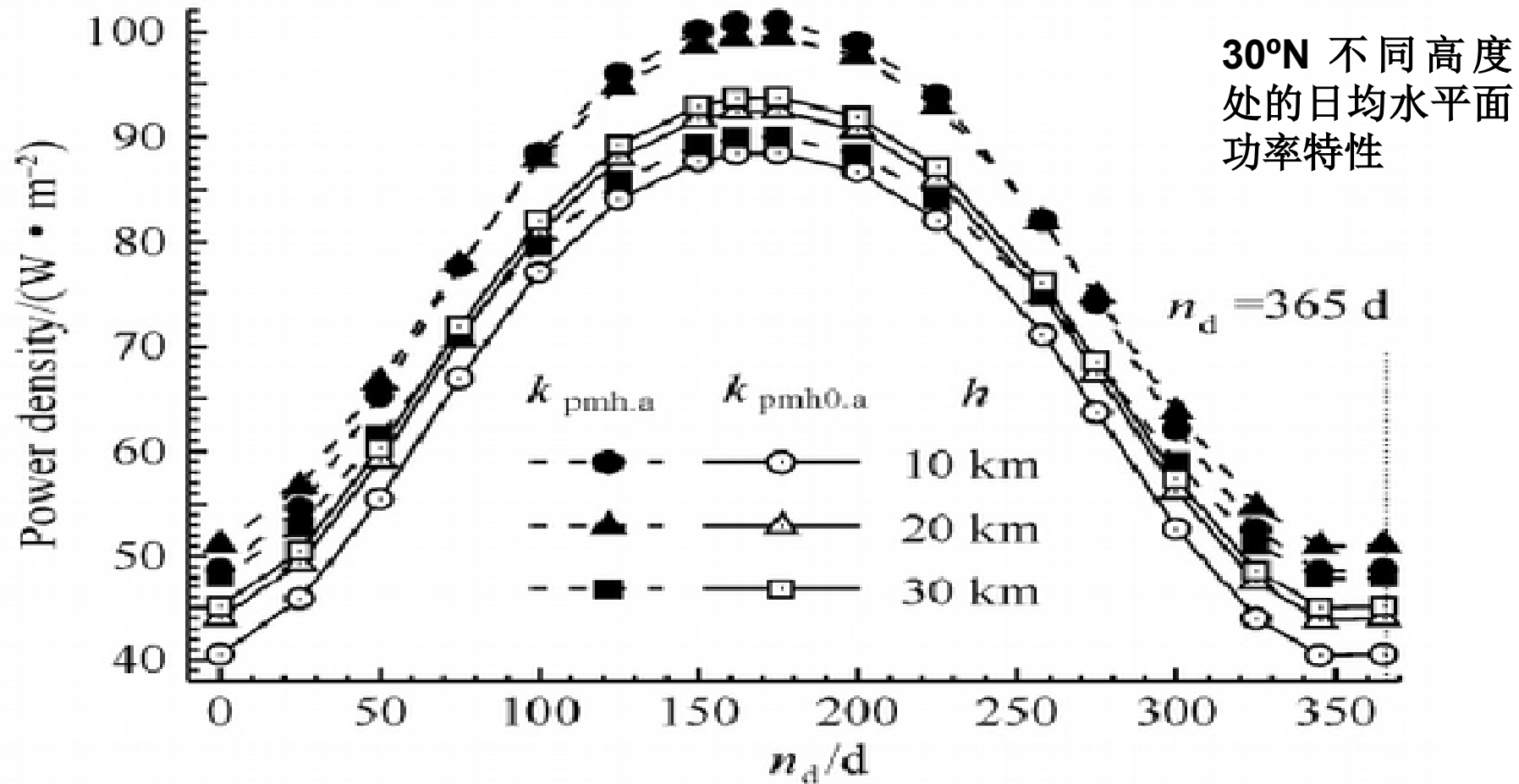
- 太阳辐照的区域性变化



地球上各地区太阳辐射强度日平均功率分布图

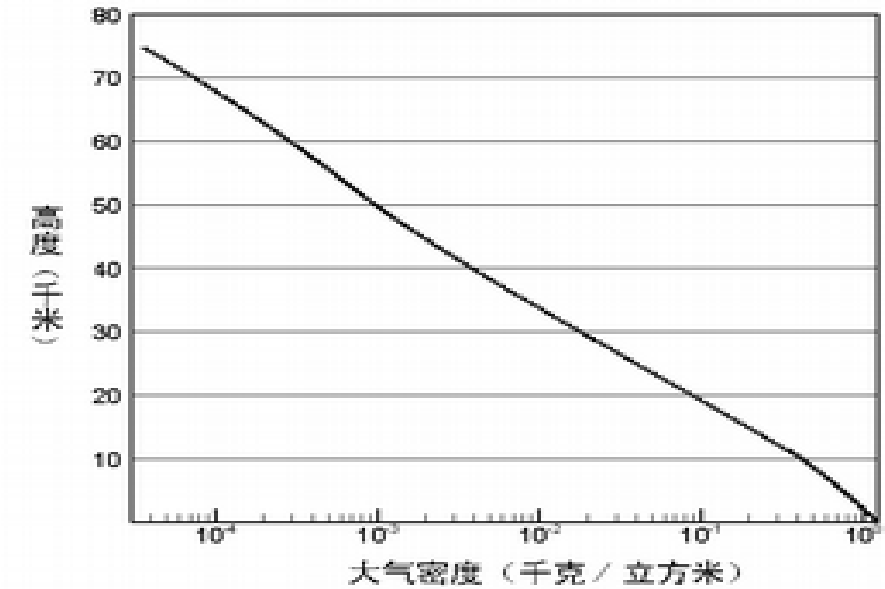


- 太阳辐照的高度性变化

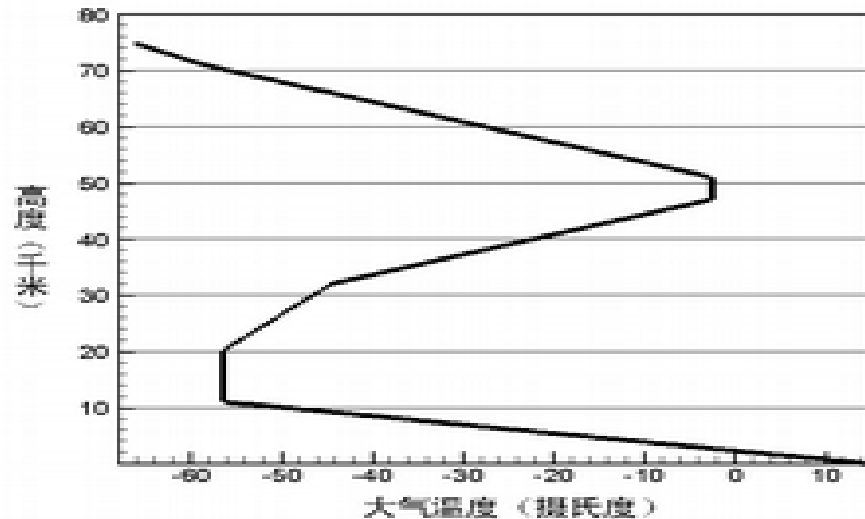


昌敏等：高空驻留太阳能飞机主动式光伏组件面功率特性研究

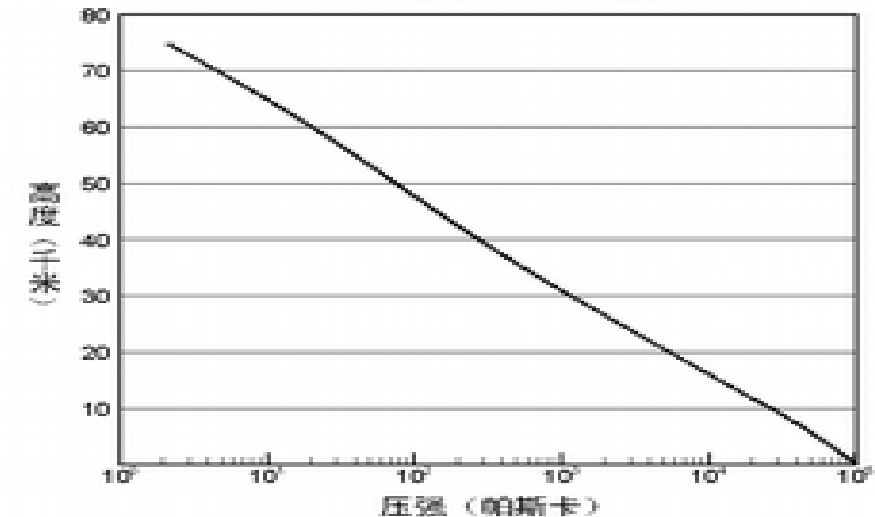
• 飞行条件的恶劣



大气
密度
变化



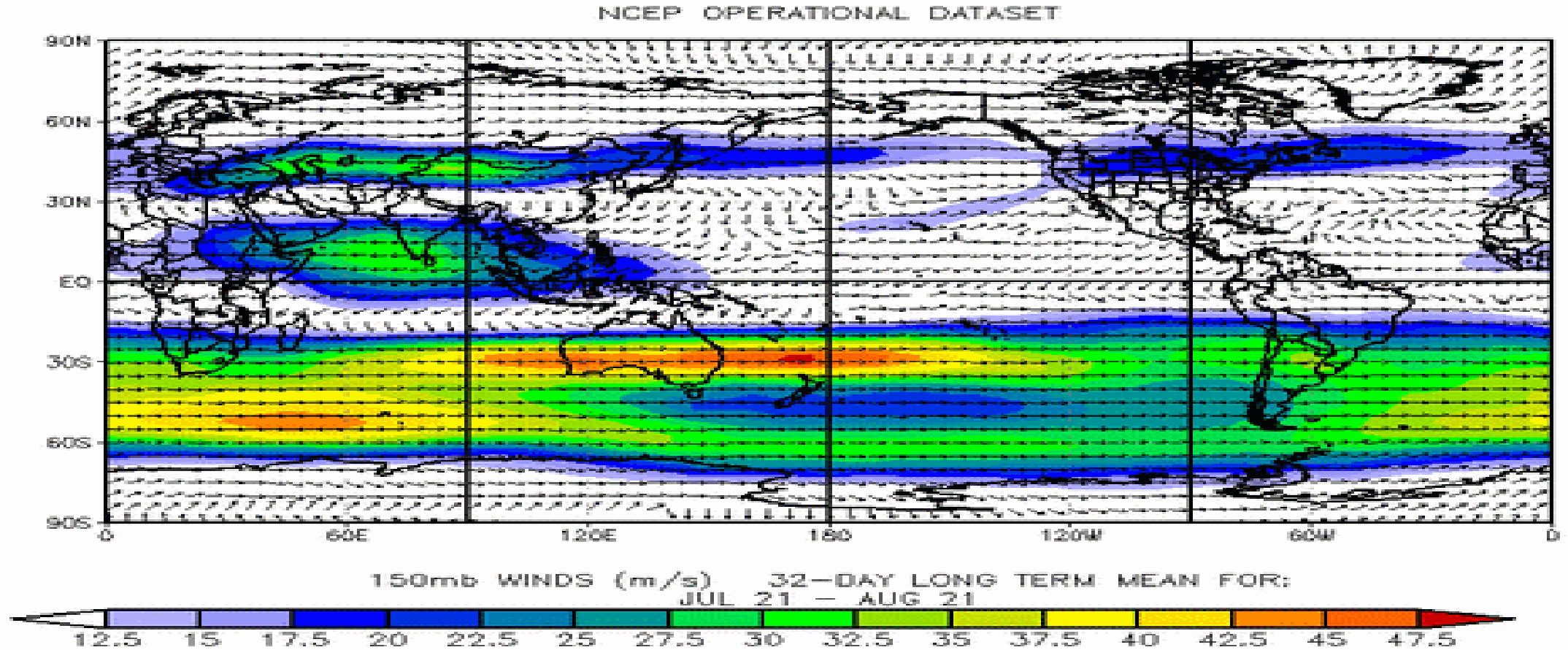
温度
变化



大气
压力
变化



- 飞行条件的恶劣



- 平台自身能力的限制

- (1) 平流层飞艇

- 浮升力作用，飞行速度可以低；
 - 上升速度快；
 - 机体惯量大；
 - 艇体的超压能力和气密性对飞行航时影响重大。

- (2) 太阳能飞机

- 动升力作用，机动性较飞艇强；
 - 上升速度慢；
 - 载荷能力有限；
 - 气动特性要求高。（升阻比 **28** 以上）



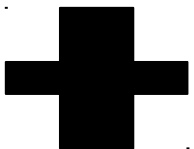
飞行平衡条件的复杂化

升-重平衡

$$L = W \Rightarrow \frac{1}{2} \rho v^2 C_L S_w = mg$$

推-阻平衡

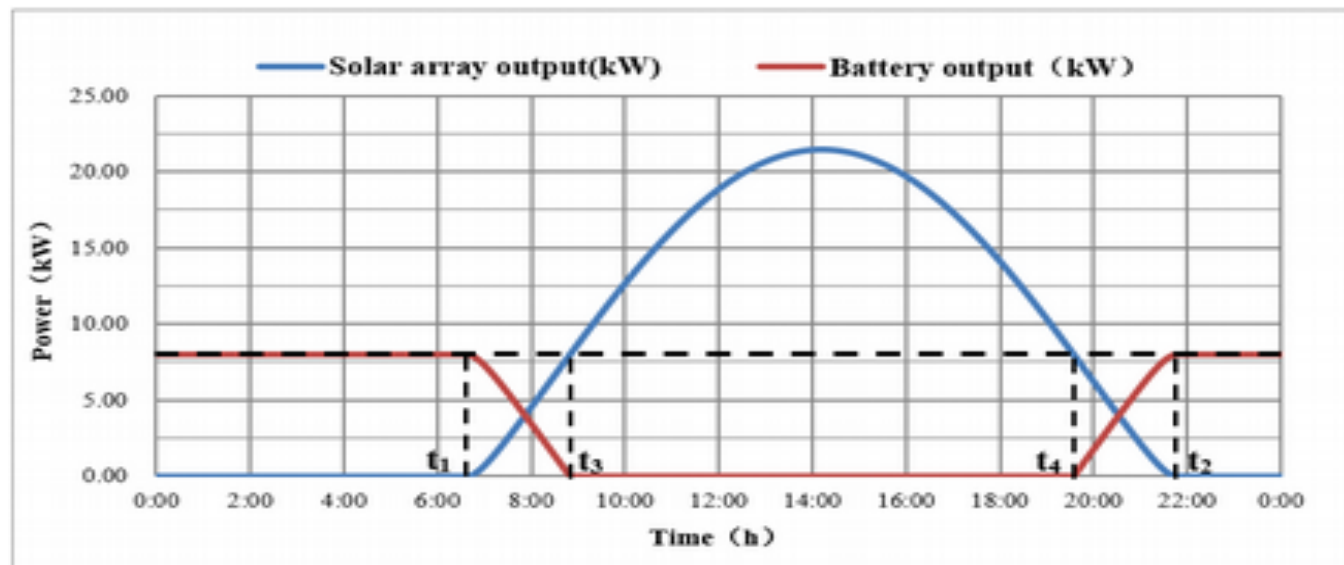
$$T = D \Rightarrow D \bullet v = mg \frac{1}{L/D} \sqrt{\left(\frac{mg}{S_w}\right) \frac{2}{\rho \bullet C_L}}$$



能量平衡

$$\left\{ \begin{aligned} & \int_0^{24+t_3-t_4} (P_{pro}(t) + P_{ap}(t)) dt - \int_{t_1}^{t_3} I(t) \eta_{sc} \eta_{whr} \eta_{sc-w} dt \bullet S_w \\ & - \int_{t_4}^{t_2} I(t) \eta_{sc} \eta_{whr} \eta_{sc-w} dt \bullet S_w = W_b K_{b-avr} (t_3 + 24 - t_4) \\ & \int_{t_3}^{t_4} I(t) \eta_{sc} \eta_{whr} \eta_{sc-w} dt \bullet S_w - \int_{t_3}^{t_4} (P_{pro}(t) + P_{ap}(t)) dt \\ & = W_b K_{b-avr} (t_3 + 24 - t_4) / \eta_b \end{aligned} \right.$$

此外，还需要有能量最小化的约束。以保证系统具备最大的载荷能力。





- 平流层飞艇设计的技术影响

- 总体方案层面

- 囊体外形：流线形囊体具有较低的气动阻力系数，但曲率半径大，对蒙皮材料强度要求高。
- 尾翼形式：平流层飞艇飞行速度较低，同时由于大气密度低，很难通过尾翼保持飞艇的气动稳定性。
- 副气囊：采用副气囊调姿调压的效能极低，副气囊的主要作用仅为飞行过程中维形。

- 超压囊体方面

- 囊体强度：包括蒙皮材料强度、焊接强度以及局部受力状态；
- 囊体密封性：包括蒙皮材料渗透率、加工损伤以及工艺微孔等。



- 平流层飞艇设计的技术影响

- 飞行控制方面

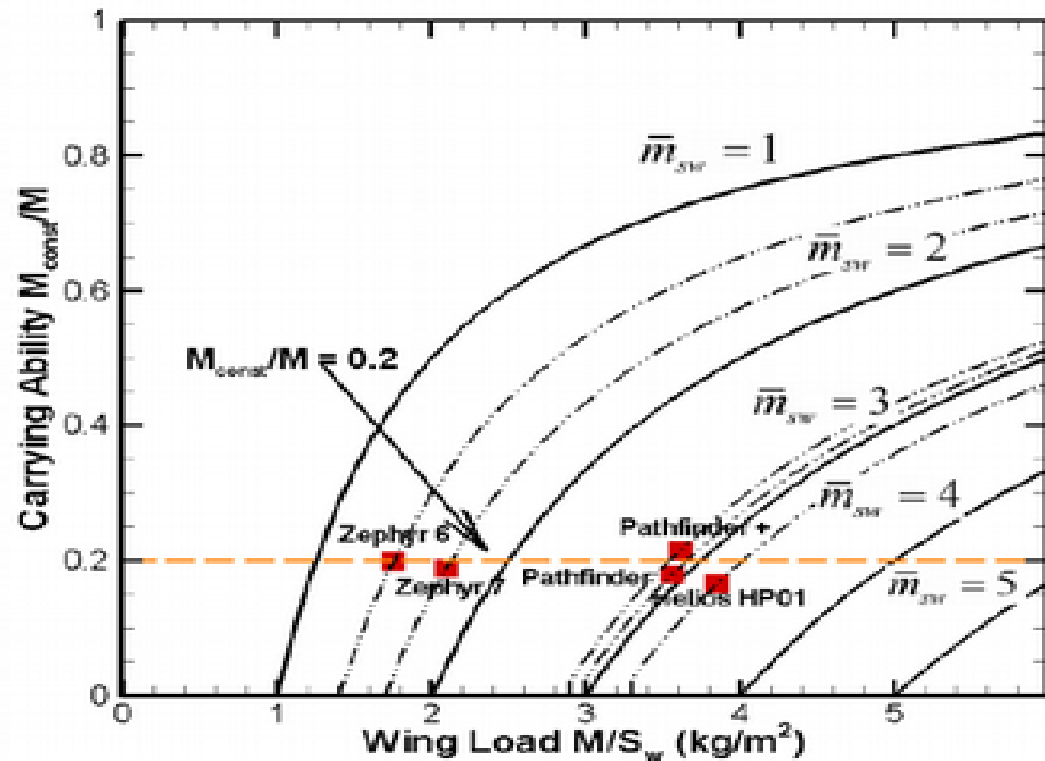
- 驻空飞行：耗散阻力较小、俯仰气动不稳定、俯仰和滚转振动周期过长，在一定工况下，俯仰滚转与偏航控制耦合较大。
- 航迹控制：电推进力系统效率很低，风场扰动速度与飞行速度同一量级，需要配备较强的矢量或直接力系统，增强主动控制和抗干扰能力。

- 定点着陆方面

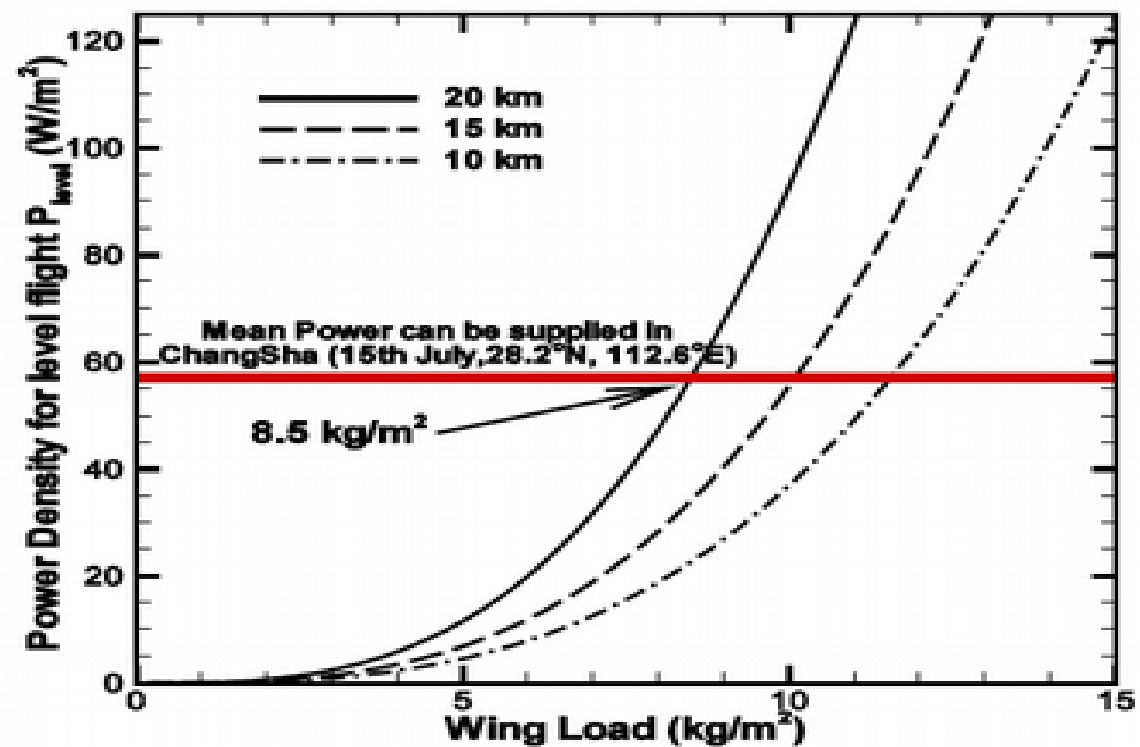
- 下降过程中净浮力损失：浮重平衡破坏后，飞艇下降速度先变慢再变快，将导致飞艇低空减速悬浮飞行和软着陆难度增大；
- 高度变化过程中的推阻平衡：是定点着陆的关键，对飞艇总体设计要求很高，实现难度大。



- 翼载荷的限制



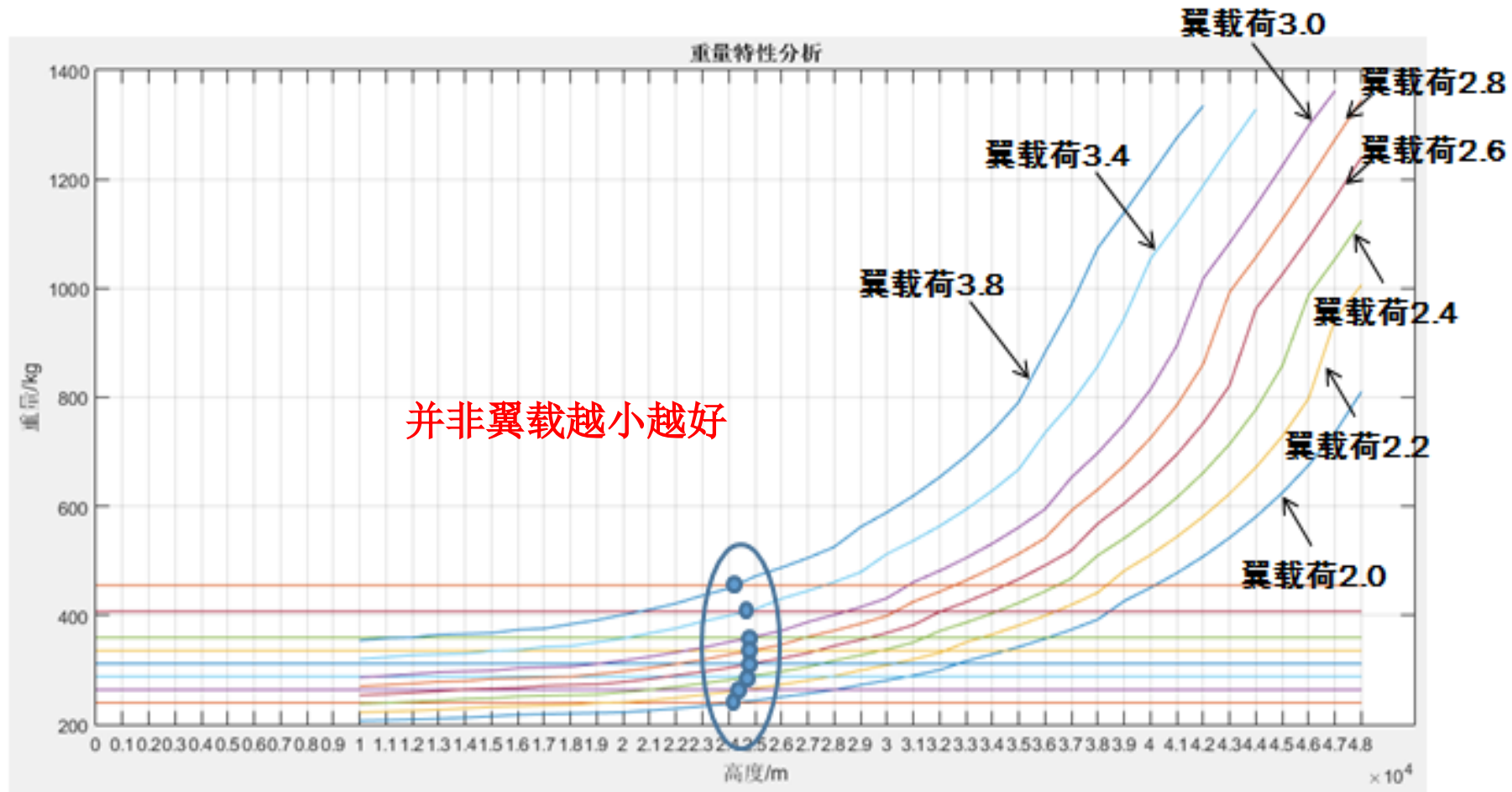
太阳能飞机翼载荷与载荷能力间关系曲线



太阳能飞机翼载荷与需求功率密度间关系曲线



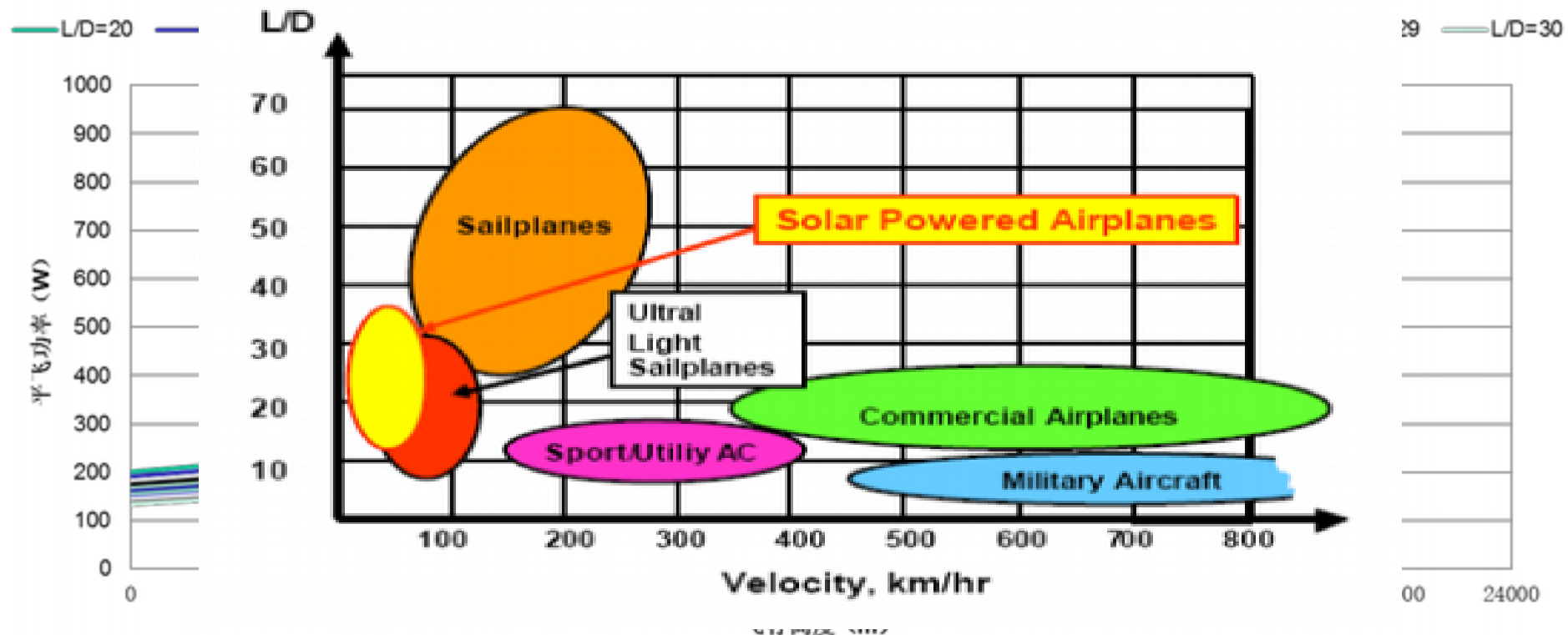
- 翼载荷的限制



不同翼
载荷对
应的平
衡高度
和升限



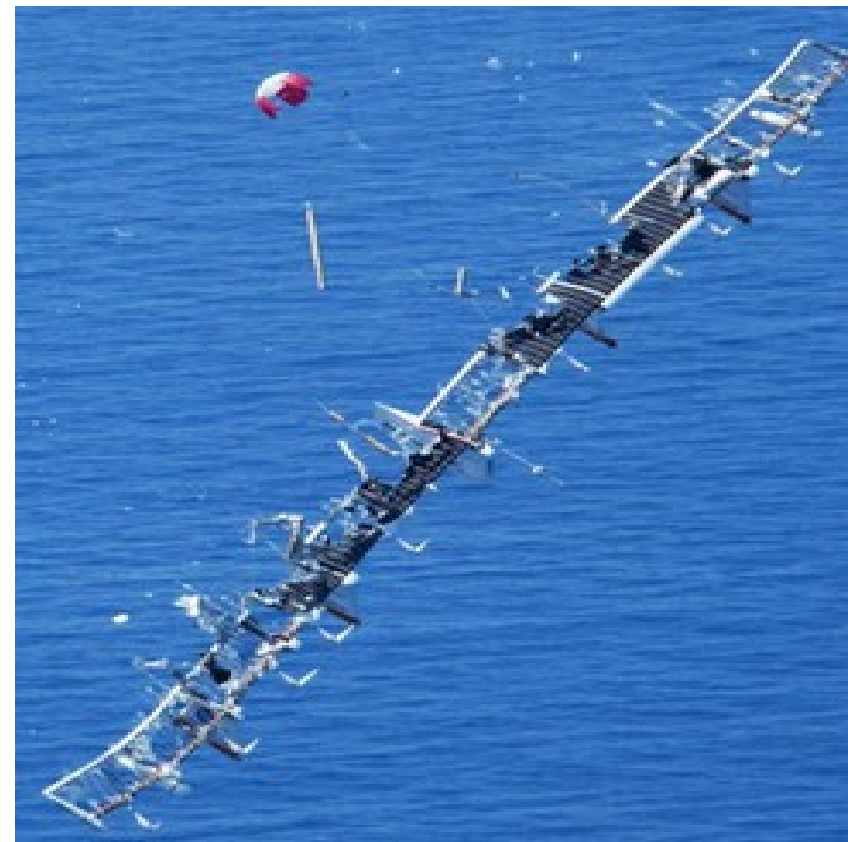
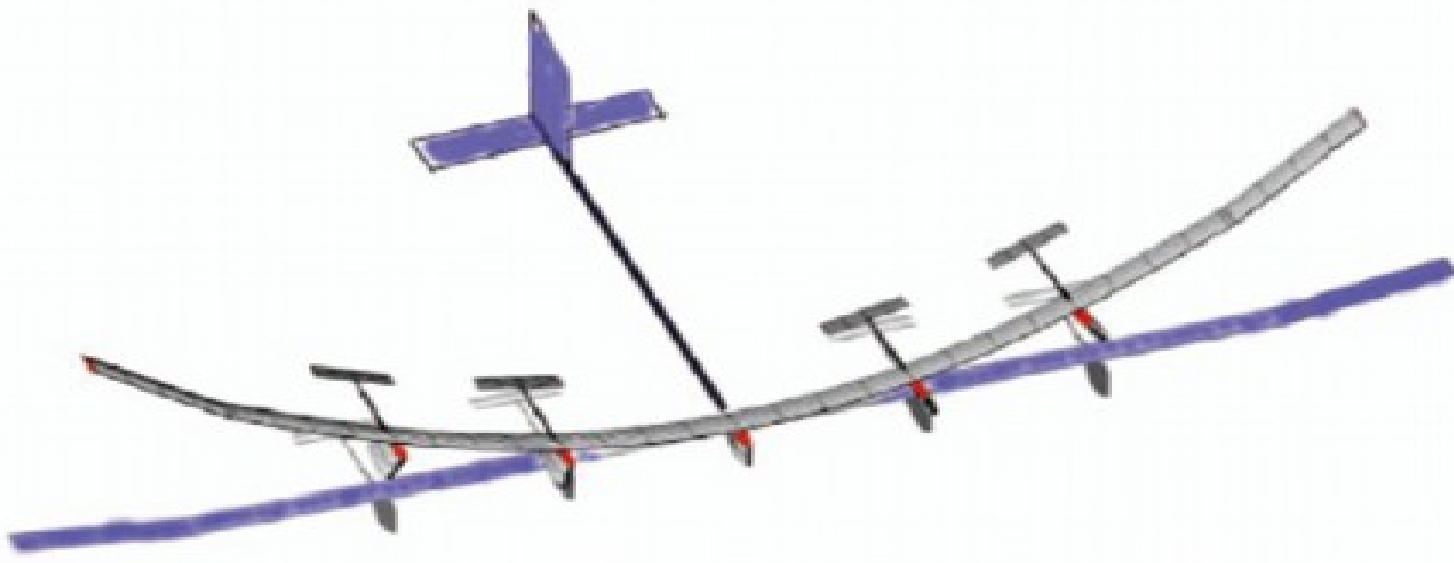
- 升阻比的影响



随高度的增加，升阻比对平飞功率需求影响越明显



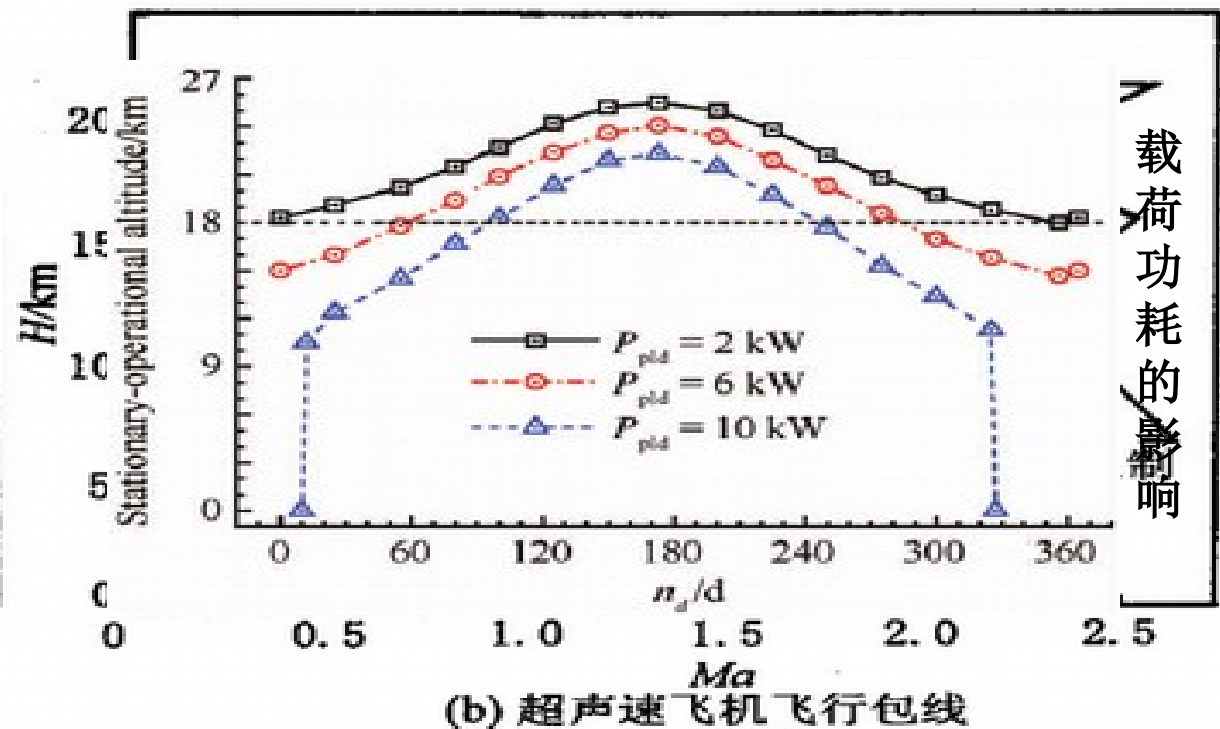
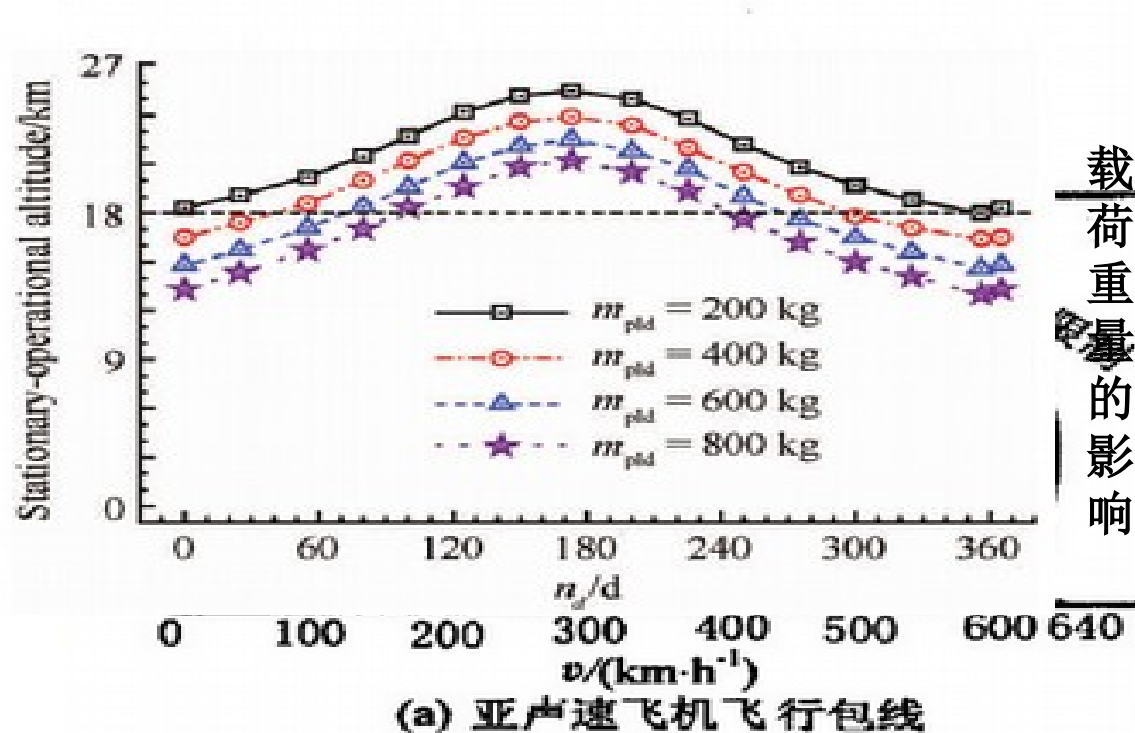
- 大尺度气动弹性的影响



美国的“太阳神”无人机就曾经因机翼发生静气动弹性变形发散，而在空中解体。

- 与传统飞机主要设计参数间关系的不同

传统飞机的飞行高度仅取决于发动机的性能，而太阳能飞机的飞行高度影响因素众多。





- 推进系统技术水平的影响

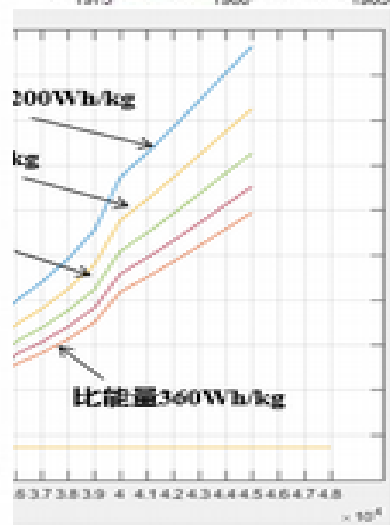
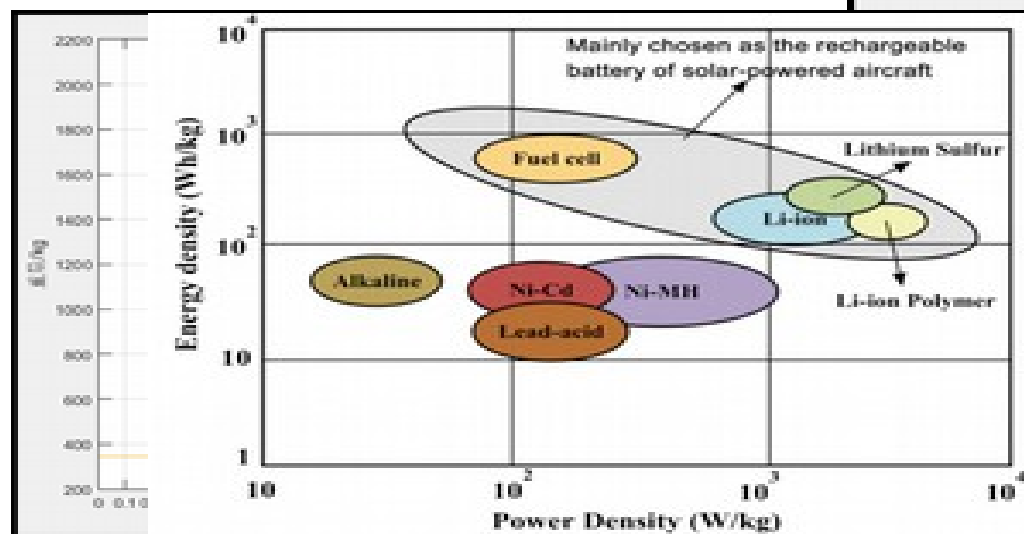
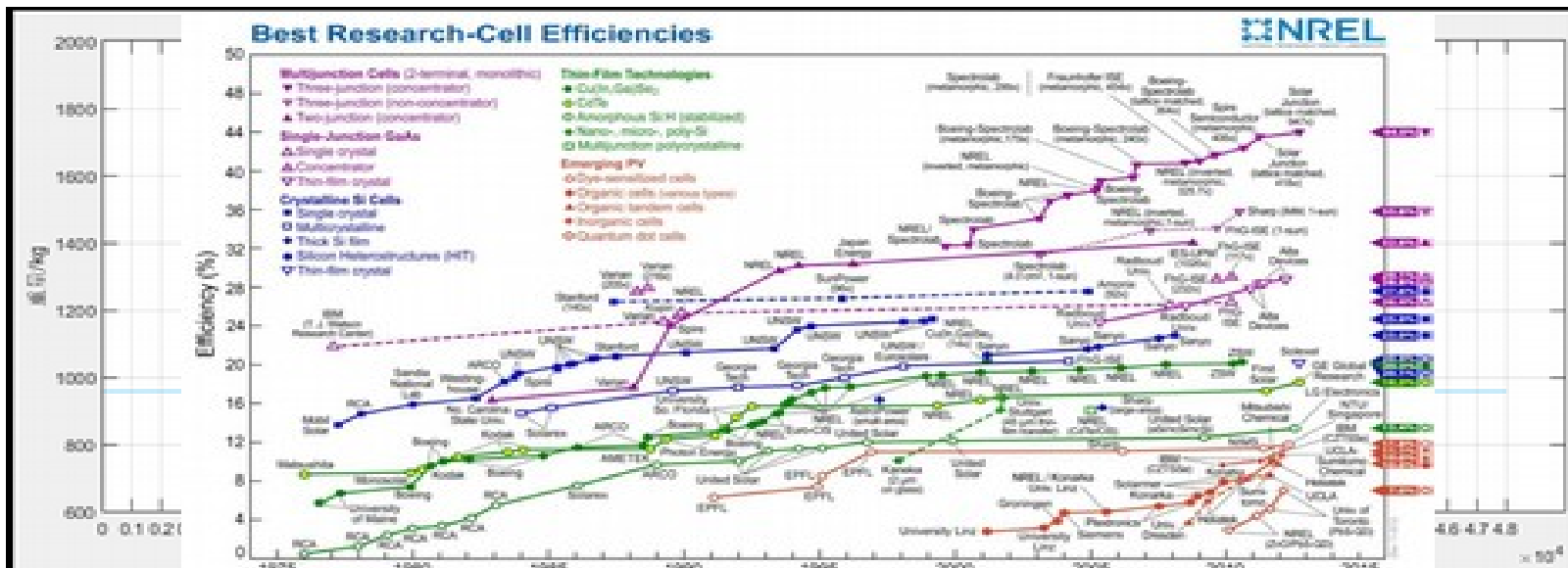
传统飞机的飞行高度仅取决于发动机的性能，而太阳能飞机的飞行高度影响因素众多。





• 能源系统技术水平的影响

太阳能电池效率的影响



储能电池比能量的影响



- 相关关键技术
 - 飞行器平台总体设计技术（系统总体方面）
 - 多学科、多系统一体化协调设计技术
 - 1 太阳能飞行器多系统协调配置设计技术
 - 2 太阳能飞行器多目标协同优化设计技术
 - 重量快速预测与重量精确控制技术
 - 1 重量快速预测与质量分布计算技术
 - 2 重量特性管理与精确控制技术



- 相关关键技术

- 飞行器平台总体设计技术（长时运行可靠性方面）

- 多信息融合智能化故障预测与健康管理技术

- 1. 动力与能源系统故障预测和健康管理工作技术

- 2. 结构健康监测及传感器网络技术

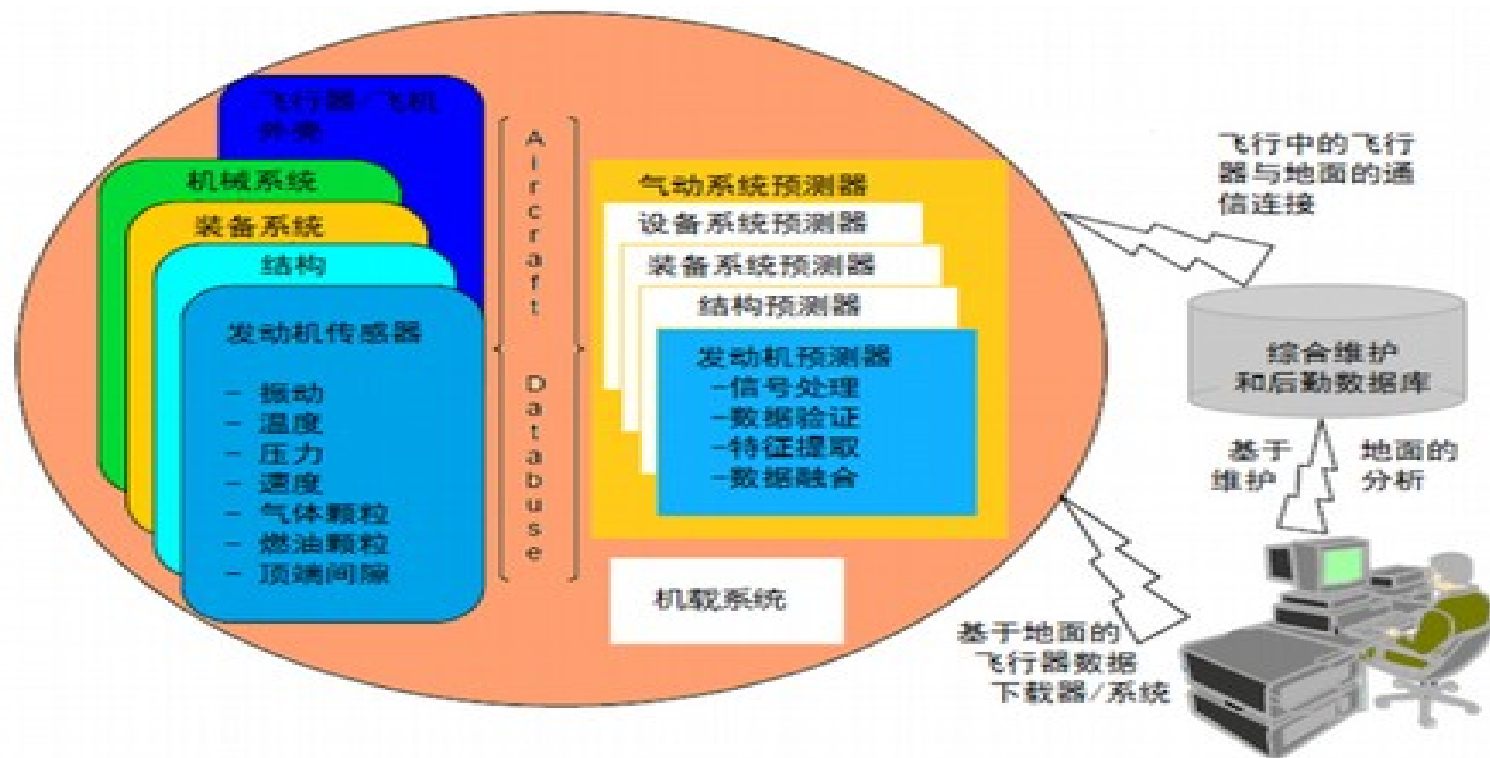
- 3. 长航时无人机辅助决策技术



- 相关关键技术

- 飞行器平台总体设计技术（长时运行可靠性方面）

- 多信息融合智能化故障预测与健康管理技术





- 相关关键技术

- 飞行器平台总体设计技术（气动、气弹方面）

- 超大柔性结构非线性动力学分析技术

- 1. 非线性结构静、动力学建模与计算方法

- 2. 非线性气动弹性 / 飞行力学建模与分析方法

- 3. 超大柔性飞行器主动控制技术

- 超大展弦比无人机飞行动力学建模与分析技术

- 低雷诺、高效气动设计与分析技术

- 1. 低雷诺数超大升阻比飞行器气动外型设计

- 2. 超高空低雷诺数高效率螺旋桨动力系统设计



- 相关关键技术

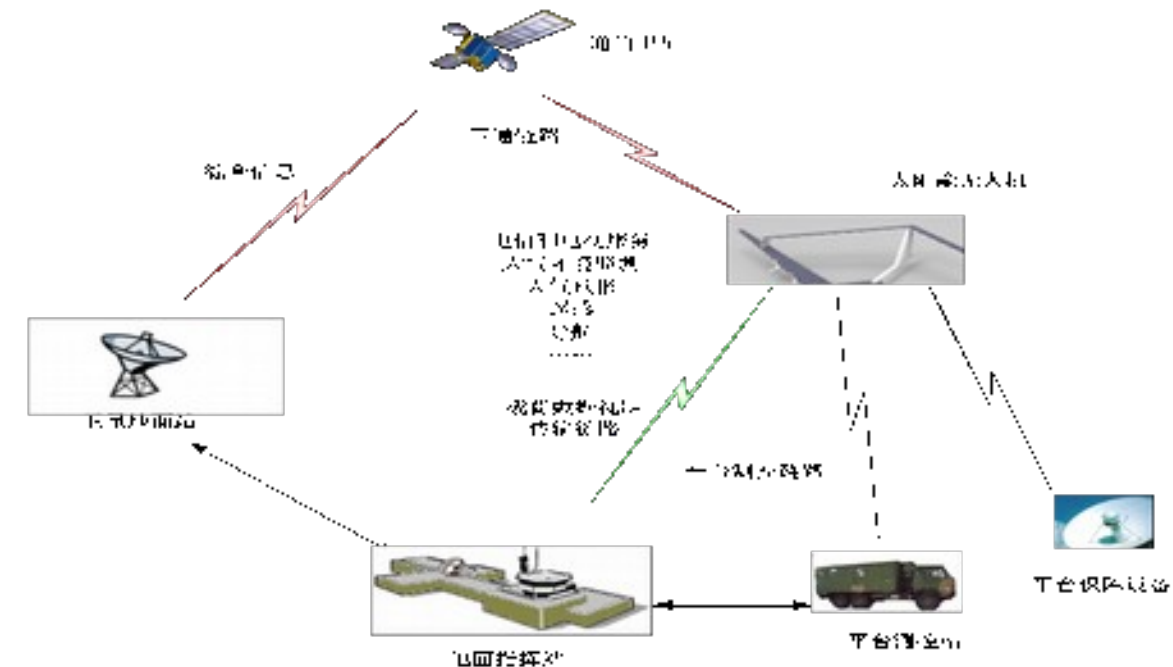
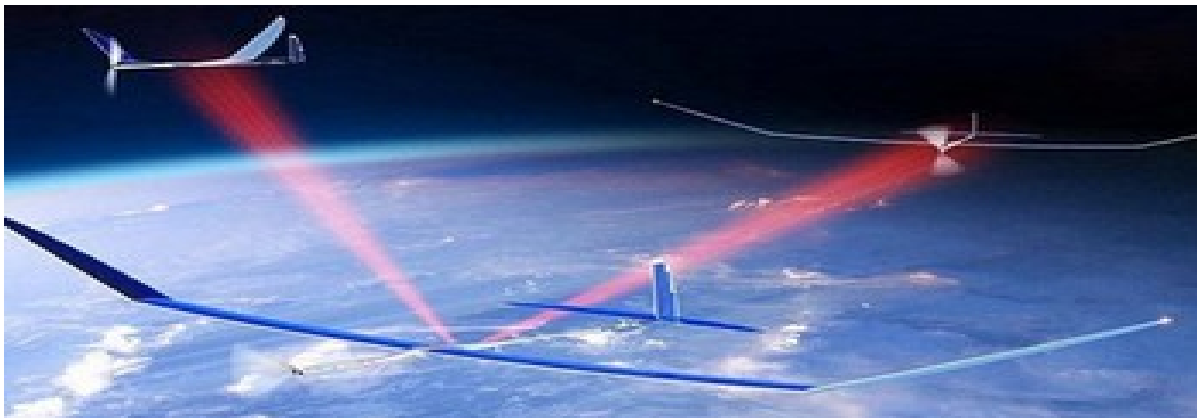
- 飞行器平台总体设计技术（结构方面）

- 超大展弦比结构空间布局设计与优化技术
 - 任务载荷的适配性和轻型化技术
 - 超大展弦比结构空间布局设计与优化技术
 - 任务载荷的适配性和轻型化技术



- 相关关键技术
 - 轻质、高效、持久能源动力系统综合技术（能源动力系统方面）
 - 高效太阳能电池技术
 - 高效、轻型储能电池技术
 - 混合能源动力综合管理与控制技术
 - 能源-结构一体化设计与成型技术
 - 高效电推进技术
 - 能源动力系统冗余设计与自重构技术

- 相关关键技术
 - 自主控制与空天网络集成传输技术（面向应用）
 - 超大型飞行器自主控制技术
 - 无人机**分布式网络**交互与控制技术
 - 星、机、地**网格信息传输**及**组网**技术



- 相关关键技术

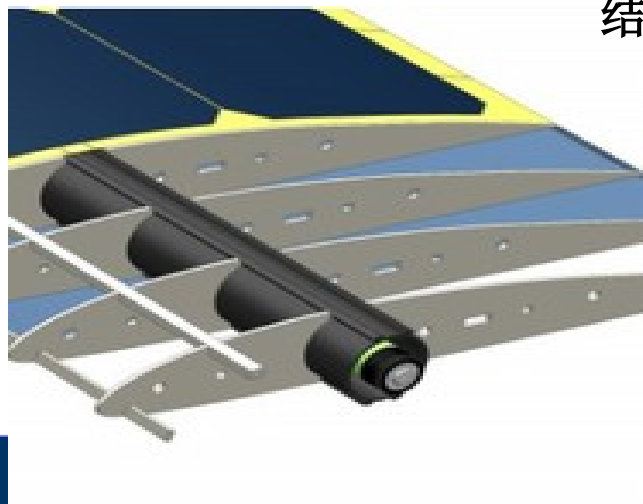
AtlantikSolar 飞行平台



结构 - 功能一体化设计

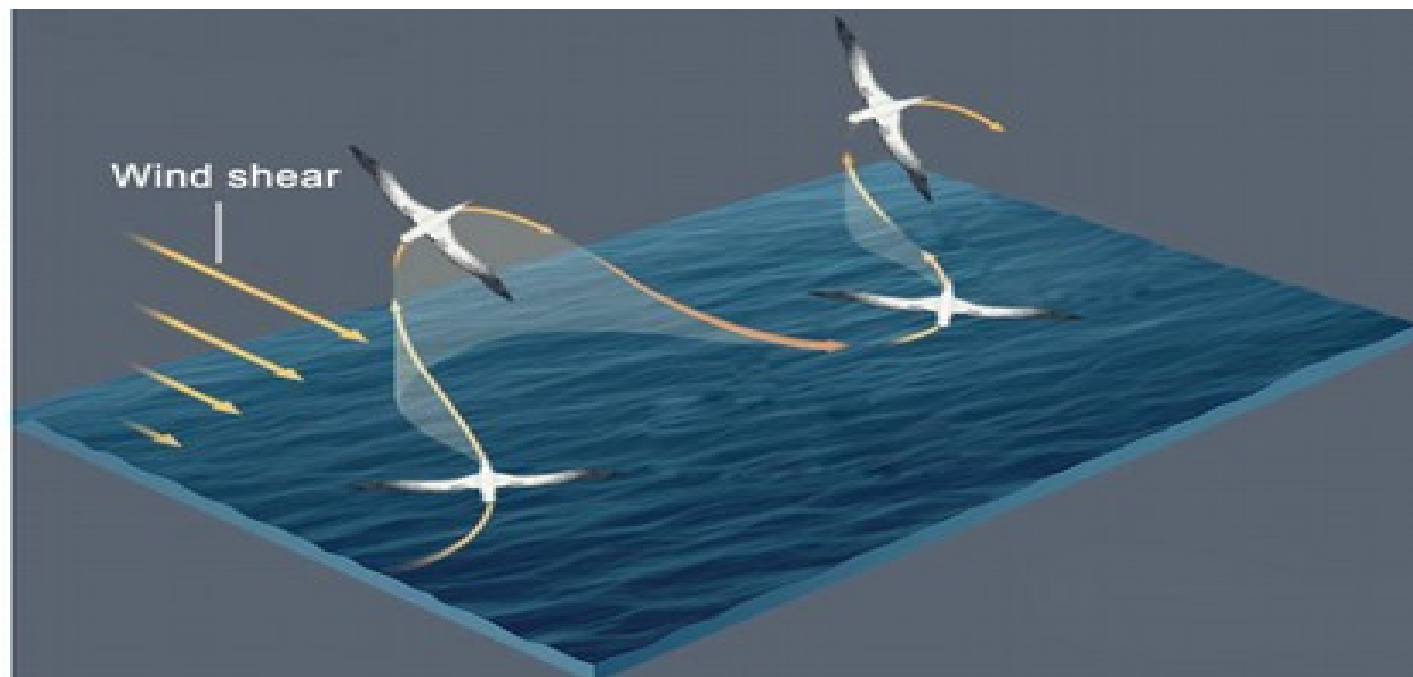


结构的轻量化设计



- 设计理念的创新

基于梯度风的飞行策略：利用大气环境中存在的梯度风，以动态滑翔的方式从风场中获取能力，转换成势能，再以高度差梯度飞行的方式实现持续留空。



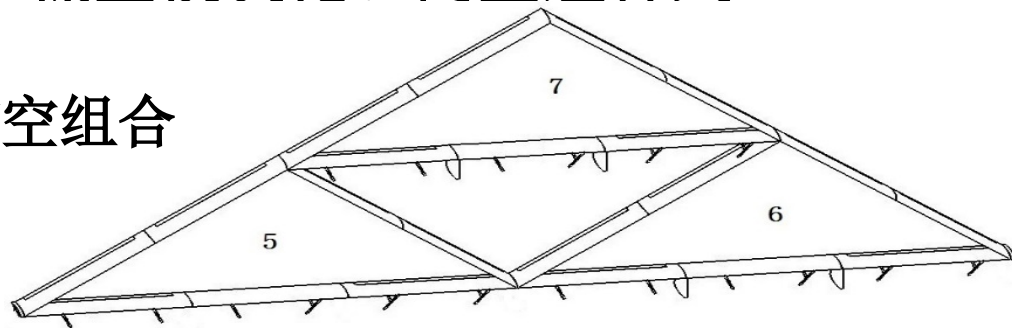
* 高显忠：基于重力势能量存储与梯度风能量获取的 **HALE** 飞行基础问题研究



- 飞行策略的创新

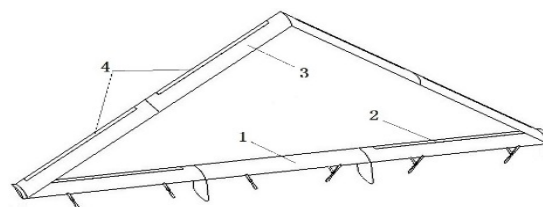
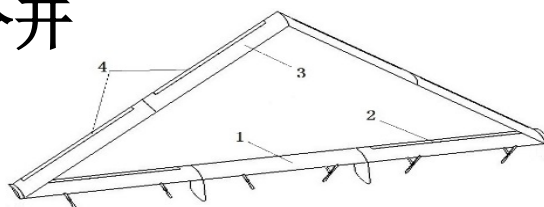
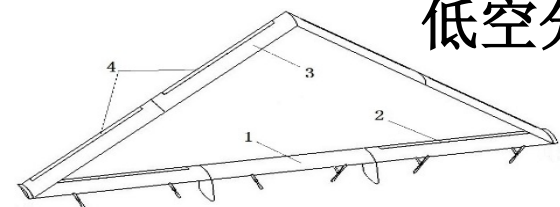
低空模块化、高空组合式

高空组合



降低飞机在低空飞行是受突风的不利影响

低空分开



非常欢迎各位同仁批评指正！

谢 谢

联系方式： 15810532766

sunkw100@buaa.edu.cn