

飞剪帆船、竞速帆船和波形线理论

(中国科学院力学研究所 李进平、刘云峰 编译自 Larrie D. Ferreiro, Alexander Pollara. *Physics Today*, 2017, (7):53)

约翰·斯科特·罗素在19世纪提出的船舶设计理论既提高了航行速度又使船舶的外形更加优雅。但是，最终这一理论还是没有站住脚。

现今的造船业都采用英国工程师威廉·弗劳德在19世纪末提出的相似律来预测船舶的速度和功率。但是，早在弗劳德之前，造船工程师们就已经知道船体的比例和形状会影响航行速度，并试图寻找其中的物理规律。

在16世纪晚期，英国造船工程师马修·贝克将一幅具有鳕鱼头和鲭鱼尾的杂交鱼的图案绘于一艘伊丽莎白时代的战船之上，并风靡一时。尽管当时缺少科学和实验的基础，但是船体形状应该由自然规律来确定的思想已被广泛接受。贯穿整个17至18世纪，由于科学革命，在水动力学和阻力研究方面不断涌现出新的思想。为了建造速度更快



图1 约翰·斯科特·罗素(1808—1882)在1847年的照片(图片由皇家海军建筑师学院提供)

的军舰，欧洲各国海军委托科学家和发明家来测试这些新思想。在19世纪早期，船舶开始使用蒸汽动力。蒸汽船的运行费用与煤的消耗量直接相关，而煤的消耗取决于阻力，因此建造快速高效的船体成为造船工程师的追求目标。

到了维多利亚时代，一位具有数学家头脑的英国工程师约翰·斯科特·罗素(图1)提出了一套普适的可确保船体阻力最小的设计准则，被称为波形线理论。该理论指导轮船设计长达半个世纪之久，不仅包括蒸汽船，还包括竞技体育中的飞剪帆船和竞速帆船。虽然波形线理论最终被弗劳德的更加严密的理论所取代，但它的故事却是一堂具有启发意义的历史课。

波形线理论

作为一位受人尊敬的造船工程师，罗素既具备数学知识，同时又具有丰富的工程经验，在当时的英国无人能与之相比。他从1835年开始研究波形线理论。在那时，科学家已经知道船舶阻力主要由水动压和摩擦力两部分组成。罗素首次提出兴波阻力是另外一个重要组成部分。他的观点是正确的，但是他错误地将兴波阻力仅归因于船体的形状。他认为传统船舶的船头是钝形的，在水面航行时会产生波浪，若采用合适的内凹形状，可将水排开到船体两侧而不产生波浪，从而

减小航行阻力。

在接下来的8年里，罗素开始研究兴波阻力。他建造和测试了100多个大大小小的船只，从3英尺的模型到200英尺的轮船，并进行了几千次实验。1843年，罗素在给英国科学促进会的报告里指出，他发现了新的物理定律，命名为波形线理论，并声称利用该理论可设计任何尺寸的船舶。根据该理论，每一个航行速度都对应一个船体形状和相应的船体尺寸。

罗素新理论的前提是船体形状应该与其产生的波浪形状一致。他假设有两种类型的水波与阻力相关：即船首的正弦型平移波和船尾的摆线型复位波。罗素的研究主要集中于船首正弦波。通过实验研究，他得出船首正弦波的波长满足 $L=2\pi V^2/g$ ，其中 V 为船速， g 为重力加速度。他认为若要阻力最小，船首水线需采用波长为 L 的正弦波形状，正弦波形状的水线可使水面的扰动最小。同样，罗素还认为船尾水线应该采用摆线的形式(图2)。由于强调正弦线和摆线，因此波形线理论缺少物理基础，只是几何描述性的概念。最终，与罗素的预言相反，波形线理论并没有在每一艘船上都取得成功。

在蒸汽船和帆船上的应用

罗素的波形线理论发表时，正值蒸汽船迅速取代帆船的时期。商

船需要在贸易路线上快速往返，造船商也将细长的船体视为速度的象征，所以在1845年后，波形线理论受到了广泛的欢迎。蒸汽船采用波形水线通常表现尚可，但也有一些例外。比如，苏格兰造船工程师詹姆斯·纳皮尔根据罗素的波形线理论建造了几艘航行于爱尔兰海的蒸汽船，就表现得非常糟糕。

罗素在他自己最著名的“大东方”号游轮设计上采用了波形线理论(图3)。该船是当时最大的轮船，原打算从英国运送乘客至澳大利亚，但从未实现，只横渡几次大西洋。尽管如此，“大东方”号却给儒勒·凡尔纳留下了深刻印象，激发他创作了《海底两万里》中的“鹦鹉螺”号潜艇。

波形线理论最初是为蒸汽船发展的，但在帆船中发挥到了极致，尤其是对于19世纪中晚期的飞剪帆船和竞速帆船。对于这两种船，所有的设计都要服从对速度的追求。飞剪帆船最先是由美国船舶设计师约翰·格里菲思于1840年发展起来的，并受到了罗素的内凹形水线的启发。

对于竞速帆船，波形线更是其显著特征。在1851年，纽约帆船俱乐部的乔治·斯蒂尔斯建造了与波形线理论完美契合的纵帆船“美国”号。在随后的“百吉尼”杯比赛中，“美国”号完胜皇家游艇中队。“美国”号的胜利使波形线理论获得了国际赞誉并被广泛采用。但并不是所有人都相信波形线理论，这其中就包括 Nathanael Herreshoff。他从1893年到1920年连续赢得5届“美洲”杯，并且所有的帆船都没有采用波形线设计。对有些人来说，Herreshoff的成功并不意外，因为他们早就对波形线理论表

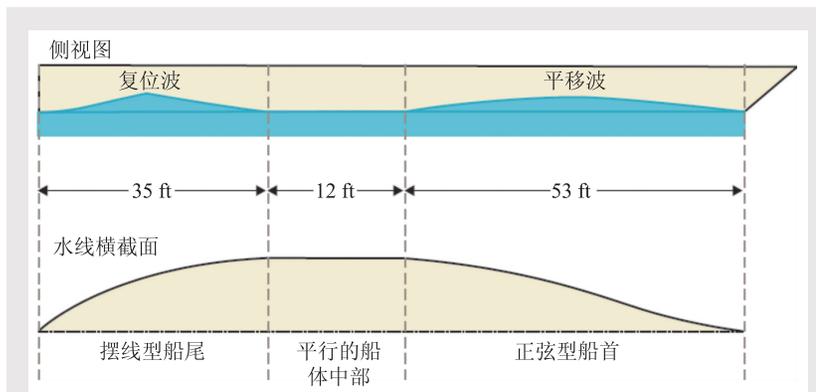


图2 波形线理论规定了3个主要船体几何参数：船首采用正弦波形式，船尾采用摆线波形式，船体中间部分采用平直并与中心线平行的方式。船首和船尾的长度与相应的正弦波和摆线波波长一致，船体中间长度根据船体总长的需要调整

示怀疑。

波形线理论的消亡

威廉·兰金是对波形线理论有所怀疑的科学家之一，他在1867年前后提出了基本正确的阻力计算方法，但对于当时的造船业来说实在是太复杂了。威廉·弗劳德与罗素很熟悉，他在1865年通过模型试验比较了波形水线和圆钝形水线对阻力的影响，发现圆钝水线模型表现出更小的阻力。而后，在皇家海军的资助下，弗劳德在1871年建成了模型试验水池。在此后的10年里，弗劳德和他的儿子罗伯特发展出了计算船舶阻力的相似律理论。

弗劳德的相似律理论经过了100多年的理论和实验的检验。罗素的波形线的前提，即只在船首和船尾产生兴波阻力，在弗劳德的公式中被更基本的物理机理所替代，即能量通过整个船体向周围的水传递。模型试验也逐渐揭示了其他对船舶阻力和功率有重要影响因素，并否定了所有基于几何原理得

出的水线形式。

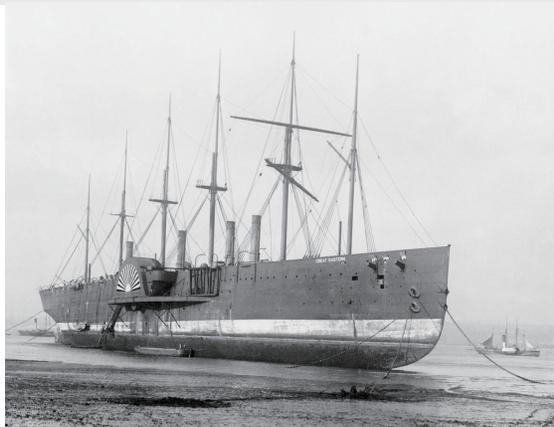


图3 大东方号游轮，采用著名的约翰·斯科特·罗素的波形线理论设计，运载旅客横渡大西洋，但最终没有实现设计初期提出的英国—澳大利亚的航行。它修长的船首构型为科幻小说《海底两万里》中鹦鹉螺号潜艇的设计提供了灵感(图片由维多利亚州立图书馆提供)

出的水线形式。

1906年，国际著名期刊《工程》的一篇文章写到：萦绕在早期海军工程师脑海中的寻找“最小阻力形状”的问题一直没有解决。现代的造船工程师知道在考虑所有参数的情况下，设计一艘轮船的形状并不是一件容易的事。“最小阻力形状”取决于速度、长度、以及其他所有与船体形状相关的参数。罗素是从他自己设定的公理中得出他那著名的“波形线扰动最小，因此可能阻力最小”的结论。至此，罗素的波形线理论彻底退出历史舞台。