

報告番号 ※ 乙 第 2202 号

主論文の要旨

題名 非線形ばね特性・異方性をもつ
回転軸の振動

氏名 池田 隆

報告番号

※甲第

号

氏名

池田 隆

近年のめざましい工業の発展に伴い、各種プラントに施設される機器類は高出力化・高性能化の一途をたどり、最近の大型コンビナート、火力・原子力発電所、大型運搬機などに使用されるタービン、発電機、ポンプ、電動機などの回転機についてもその例外ではない。従来、回転機の高出力化・大容量化は軸径を増すことで達成されてきたが、最近では主危険速度を超えた高速回転で運転されることが多くなり、遠心力に対する軸強度の制約から、軸径の増大よりも軸長を増すことで実現されてきている。そのため、回転軸は次第にフレキシブルになり高速回転時での軸の振り回り振動が問題となり、高速時での優れた回転性能が各プラントの心臓部とも言える回転機に要求されてきているのが現状である。

このような機器の設計、振動対策にあたって最初に問題になるのが「バランス」と固有振動数の決定である。最近では電子計算機の進歩・普及により、固有振動数の計算法やバランス技術は飛躍的に向上し、主危険速度を超えた高速回転の際にも振幅を低いレベルに抑えでの運転が可能になってきた。しかし回転機の中には、タービン発電機の回転子や二極モータなどに見られるように回転軸の剛性の異方性、回転体の慣性モーメントの異方性が存在し、系はいわゆる係数励振系となる場合があり、主危険速度付近やさらに高速回転数の副共振点付近での不安定振動、水平偏平軸に関する二次的危険速度などが問題となっている。厳密にはこのような異方性は大小の差こそあれすべての回転機に存在し、これらの異方性の存在は、特に高速回転領域において回転性能に悪影響を及ぼすことから、高速回転化の進みつつある現在ではこの種の問題解決の必要性は増しつつある。

一方、非線形振動は、1926年に発表された Van der Pol の三極真空管

報告番号

※甲第

号

氏名

池田 隆

空管発振原理に関する研究によって多くの研究者に興味を持たれ始め、その後1930年代に特にソ連においてははなはなしい発展を遂げ、現在に至るまで電気通信工学、自動制御工学、および機械工学などの分野において多くの非線形振動の研究が世界各国で報告されてきた。しかし、これまでの研究のほとんどは往復振動系に限られ、往復振動系とは本質的に異なる振動特性をもつ回転軸系の非線形振動については、3の研究報告があるにすぎない。現在、回転機には経済性・保守管理面からも優れているころがり軸受が多く用いられているが、その中でも代表的な玉軸受には角度のがたが存在し、そのため回転軸が非線形ばね特性をもつことによつて生ずる分数調波振動や和差調波振動が、振動トラブルの発生例として報告されている。これらの非線形振動は、従来ではあまり問題とならなかった高速回転領域に見られることが多く、これらについてはまだ十分な解明がなされているとは言えない。

以上のように回転軸の振動に関し、異方性をもつ回転軸系の線形振動と丸軸回転軸系の非線形強制振動は従来おたがいに無関係に研究されてきたが、回転軸および回転体の異方性と非線形ばね特性が共存する回転軸系の非線形振動については、偏平軸の分数調波振動の報告があるにすぎない。著者は、これら両者が共存する場合の偏平軸系と非対称回転体系についてさらに研究を進め、これらの系に発生する各種の振動の諸特性を明らかにした。また、非線形ばね特性あるいは軸の偏平性のみが存在する系で従来見逃されていた新たな振動現象についても理論的、実験的に解明している。

本論文は7つの章から成り、第1章は使用した実験装置の説明とその運動方程式に関しての記述である。

第2章では、非対称回転体をもつ円形断面の鉛直回転軸が、単列深

報告番号

※甲第

号

氏名

池田 隆

みぞ形玉軸受の角度のがたにより非線形ばね特性をもつ場合に、その主危険速度付近に発生する非線形強制振動を理論的、実験的に扱っている。この系では、軸が線形ばね特性の場合に軸回転速度と同じ振動数をもつ現れる不安定振動は消滅し、共振曲線は軸の回転速度により1個、3個、5個の振幅が存在する領域に分けられる特異な形状になり、これらの境界の回転速度において跳躍現象が現れる。また共振曲線の形状は、回転速度の減速時に1回あるいは2回の跳躍現象が現れる2種類のものに分類でき、そのいずれのタイプが生ずるかは回転体の不つりあいの角位置のみにより決定されるなどが明らかにされている。

第3, 4, 5章では偏平軸に円板を取付けた回転軸系(偏平軸系)と非対称回転体を丸軸を取付けた回転軸系(非対称回転体系)において、主危険速度以外の回転速度で発生する非線形強制振動が扱われている。各系には単列深みぞ形玉軸受が軸端に使用され、その軸受に存在する角度のがたにより回転軸は非線形ばね特性をもち、実験装置の組立状態を変えることにより軸受の角度のがたの範囲と上下軸受中心線との相対的位置関係が変わり、その結果得られるさまざまな非線形ばね特性に対して実験を行なった。このうち第3章では、非線形ばね特性をもつ偏平軸系における和差調波振動を扱っている。解析は主に2自由度系の傾き振動について行ない、系の固有振動数を $p_f(>0)$ 、 $p_b(<0)$ とすると、軸回転速度が $p_f - p_b$ の値に近くなるときに発生するタイプの和差調波振動を主に扱った。その結果、この種の和差調波振動には、軸の非線形性と異方性が共存することにより不安定振動が発生する場合があり、この不安定振動が発生する共振曲線を含め、共振曲線が高速側へなびく安定な漸硬形のもの、低速側へなびく安定

報告番号

※甲第

号

氏名

池田隆

な漸軟形のもの、および大きな外乱を加えない限り振動は発生しない場合の典型的な4種類の形状の共振曲線が得られた。また、この種以外の和差調波振動には不安定振動は発生せず、さらにこれらの和差調波振動の諸特性は対応する分数調波振動と類似していることなどを明らかにした。実験においても、装置の組立状態を変えることにより不安定振動が発生する共振曲線などの理論解析結果と定性的に同じ4種類の共振曲線を得た。

第4章では、非線形ばね特性をもつ非対称回転体系の分数調波・和差調波振動を扱っている。解析は2自由度系で行ない、主に軸回転速度が $2p_f$ に近くなるときに発生する $1/2$ 次分数調波振動と、 $p_f - p_b$ の値に近くなるときに生ずる和差調波振動について共振点近傍の近似解を調和バランス法により求め、それぞれの振動の共振曲線を表す式を得ている。数値計算の結果、1個の円板を丸軸に取り付けた非線形回転軸系(対称な系)には現れない不安定振動の発生する共振曲線を含め、第3章の偏平軸系で得られた共振曲線と同種の形状のものが得られた。また実験では、これらのタイプの振動に関し、不安定振動の発生も観察され、理論結果と定性的に類似した4種類の共振曲線を得た。

第5章では、偏平軸系および非対称回転体系において、軸回転速度が $(p_f - p_b)/2$ の値に近くなるときに生ずる超和差調波振動について解析を行ない、丸軸に円板を取り付けた対称な系における同種の振動と比較している。その結果、軸の偏平性や回転体の非対称性がこの種の超和差調波振動の発生を容易にすること、不安定振動が発生する場合のあることなどの結論を得た。実験では、対称な系にはこの種の超和差調波振動は観察されず、異方性のある回転軸系に限って現れ、また不安定振動も発生した。

報告番号

※甲第

号

氏名

池田 隆

第6章では、非線形ばね特性をもつ丸軸に円板を取付けた回転軸系に発生する分数結合調波振動について解明している。単列深みぞ形玉軸受で支えられた回転軸の上下軸受中心線の一致が良好であるときには、主として対称非線形特性のみが現れ、さらに玉軸受内の鋼球の直径に不ぞろいがあると、鋼球の公転速度とその2倍の振動数をもつ2個の強制外力が系に加わってくる。まずこの公転速度の2倍の振動数をもつ外力の発生機構について、解析的に説明し、実験によってもその存在を確認している。さらにそれらの外力と対称非線形ばね特性の存在とが相まって、鋼球の公転速度の $3/2$ 倍の振動数をもつ前向き歳差運動様式の分数結合調波振動が発生することを指摘し、またその共振曲線の形状など振動諸特性についても理論的、実験的に明らかにした。

第7章では、線形ばね特性をもつ偏平軸が単列深みぞ形玉軸受で鉛直に支持された回転軸系において、主危険速度の約半分の回転速度、すなわちいわゆる二次的危険速度付近で発生する軸回転速度の2倍の振動数の不安定振動を扱っている。この不安定振動は、軸端での支持条件が方向性をもつことと軸の偏平性の共存によることを解明した。すなわち、上下軸受中心線の不一致の程度が比較的大きい場合には、軸受台が完全に剛であっても玉軸受に起因して軸受支持条件に方向差を生じ、その結果軸の復元力および復元モーメントに軸回転速度の偶数倍の振動数をもつ振動成分が含まれることを解析的に明らかにするとともに、特に軸回転速度の4倍の振動成分が二次的危険速度付近に現れる不安定振動の主原因であることを示し、またこの成分の大きさを定量的に検討し、この不安定領域は比較的に広い幅をもつなどの結果を得た。実験においても、装置の組立状態により二次的危険速度付近

報告番号

※甲第

号

氏名

池田 隆

のかなり広い領域内で不安定振動が発生することを観察し、その不安定領域の存在とその幅を、系の固有振動数を実測することにより確認している。また、この不安定振動は偏平軸系に特有の現象であり、非対称回転体系では全く発生しないことを解析的、実験的に明らかにしている。